

# TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Toni Anttila

LED-kasvivalaisin

Diplomityö, joka on jätetty tarkistettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 29.9.2008

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja TkT Eino Tetri

TEKNILLINEN KORKEAKOULU Diplomityön tiivistelmä

Tekijä: Toni Anttila	
Työn nimi: LED- kasvivalaisin	Sivumäärä: 56
Päivämäärä: 29.9.2008	
Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta	
Professuuri: S-118 Valaistustekniikka	
Työn valvoja: Professori Liisa Halonen	
Työn ohjaaja: TkT Eino Tetri	
<p>Tiivistelmäteksti:</p> <p>LED- teknologian käyttö kasvihuonevalaistuksessa tulee lisääntymään. LED- valaistuksen etuja ovat mahdollisuudet energian säästöön, kasvatustilan vähentäminen ja mahdollisuudet kontrolloida kasvien kasvua. Tulevaisuudessa erityisvalaistuksen määrä kasvien kasvatuksessa tulee lisääntymään.</p> <p>Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin LED- kasvivalaisin. Työssä käytiin läpi teoreettinen pohja kasvivalotukselle ja esiteltiin suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheet ongelmineen ja erityispiirteineen. Lopuksi mittaustulokset.</p> <p>Huolimatta valittujen komponenttien heikosta laadusta valaisimet saatiin valmiiksi ja ne toimivat lähes suunnitelmien mukaisesti. Valaisimet asennetaan Teknillisen Korkeakoulun valaistusyksikön ja Helsingin yliopiston Sovelletun biologian laitoksen LEDFlowers- tutkimusprojektin käyttöön Viikin kasvihuoneelle.</p>	
Asiasanat: LED, kasvivalotus, valon spektri	

Author: Toni Anttila	
Työn nimi: LED- plant luminaire	Number of pages: 56
Date: 29.9.2008	
Faculty: Faculty of Electronics, telecommunications and automation	
Professorship: S-118 Lighting technology	
Supervisor: Professor Liisa Halonen	
Instructor: D.Sc. Eino Tetri	
<p>Abstract</p> <p>LED- lighting technology will be used in plant growth in the future. Energy saving, decrease of growth space and desire to control plant growth will be challenges of the future. The use of special lighting will increase in plant growth in future.</p> <p>A plant luminaire based on LED- technology was designed and built in this work. The thesis introduces the theoretical basis for the work and the different phases of design and building with their problems and special features. The results of the work are presented by the measurements results.</p> <p>Despite the weak quality of the selected components, luminaires were built and they perform almost as designed. Luminaire will be installed to greenhouses of Viikki for research purposes in LEDFlowers- project of Lighting Unit in Helsinki University of Technology and the Department of Applied Biology in Helsinki University.</p>	
Keywords: LED, Plant lighting, light spectrum	

## Alkulause

Tämä työ on tehty osana Suomen Akatemian rahoittamaa ”LEDFlowers”- projektia Teknillisen Korkeakoulun Valaistusyksikössä. Haluan kiittää kaikkia yksikön työntekijöitä kiinnostuksesta ja ohjeistuksesta työni etenemisen aikana.

Työn valvojaa, professori Liisa Halosta haluan kiittää runsaasta motivoinnista ja ohjeistuksesta työn aikana. Haluan myös erityisesti kiittää työn ohjaajaa TkT Eino Tetriä työn johdattamisesta alusta aina loppuun saakka.

Vanhempieni, isovanhempien ja sisareni tuesta työlle olen myös erittäin kiitollinen. Ilman heidän tukeaan ei tämä olisi ollut mahdollista.

Kummityttäreni Iris ja Julia, elämänilonne on antanut minulle valtavasti voimaa, suurkiitos!

Espoossa syyskuun 29. 2008

Toni Anttila

# Sisällysluettelo

<b>Alkulause</b> .....	<b>4</b>
<b>Sisällysluettelo</b> .....	<b>5</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Kasvien ja valon yhteys</b> .....	<b>10</b>
2.1 Kasvien valosäteilyn käyttömekanismit .....	10
2.2 Yhteyttäminen .....	11
2.3 Valon parametrit .....	13
2.3.1 Irradianssi .....	13
2.3.2 Valon laatu .....	16
2.3.3 Valon suunta .....	18
2.3.4 Valon periodisuus .....	19
<b>3 Valaisinten suunnittelu</b> .....	<b>21</b>
3.1 Suunnitteluperiaatteet .....	21
3.2 Valon määrään liittyvä suunnittelu .....	22
3.2.1 Irradianssin laskentaperiaatteet .....	22
3.2.2 Irradianssin simulointi .....	24
3.3 Rakenteellinen suunnittelu .....	27
3.3.1 Jäähdytys .....	27
3.3.2 Rakenteen kestävyys ja muunneltavuus .....	28
3.3.3 Ympäristön vaatimukset .....	29
3.4 Sähkötekkinen suunnittelu .....	29
3.4.1 Pulssinleveysmodulaatio (PWM) .....	29
3.4.2 Virtalähteen toteutus .....	30
3.4.3 Johdintiet ja johdinpaksuudet .....	32
3.5 Lopputulema .....	33
<b>4 Valaisimen rakentaminen</b> .....	<b>35</b>
4.1 Virtalähde .....	35
4.2 Vakiovirtalähteet LEDeille ja ohjauselektroniikka .....	37

4.3 Valaisimen rungot sekä LEDien ja jäähdytyslementtien kiinnitys .....	40
4.4 Kokoonpano.....	41
<b>5 Valaisimien testaus ja mittaus.....</b>	<b>43</b>
5.1 Mittausmenetelmät .....	43
5.2 Mittaustulokset .....	45
5.2.1 Säteilymittaukset.....	45
5.2.2 Sähkötekniset mittaukset.....	47
5.3 Päätelmiä tuloksista .....	49
<b>6 Yhteenveto.....</b>	<b>50</b>
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>52</b>
LIITE 1: Virransyötön periaatekuva .....	54
LIITE 2: Sinisen valaisimen mallinnuskuva pohjasta.....	55
LIITE 3: Sinisen valaisimen mallinnuskuva päältä .....	56

## Symboli- ja lyhenneluettelo

$\alpha$	Kulma maksimi-intensiteetin ja laskentapisteeseen johtavan suuntavektorin välillä
$\lambda$	Valon aallonpituus
$\varphi$	Valonlähteen avautumiskulma
ADP	Adenosiinidifosfaatti
AlGaAs	Alumiini-Gallium-Arseeni
ATP	Adenosiinitrifosfaatti
$c$	Valon nopeus
C	Tasauskondensaattorin kapasitanssi
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Rypälesokeri
$d$	Etäisyys valonlähteen ja laskentapisteen välillä
$E_e$	Irradianssi
$E_e(\alpha)$	Irradianssi pisteeseen
$E_{\text{mol}}$	Energia yhdessä moolissa valokvantteja
$E_p$	Fotosynteettinen fotonivuo
$E_p(\alpha)$	Fotosynteettinen fotonivuo tiettyyn pisteeseen
$f$	Taajuus
$g$	Suuntaavuuskerroin
$h$	Planckin vakio
HPS	High pressure sodium – Suurpaine-natrium
H <sub>2</sub> O	Vesi
$I_e(\alpha)$	Säteilyn intensiteetti tiettyyn kulmaan

$I_{eo}$	Säteilyn maksimi-intensiteetti
$I_D$	LEDin läpi kulkeva virta.
$I_{max}$	LED- virtalähteiden ottama maksimivirta
LED	Light emitting diode – loistediodi
$N_A$	Avogadron luku
NADP+	Nikotiiniamidi-adeniini-dinukleotidi-fosfaatti-ioni
NADPH	Nikotiiniamidi-adeniini-dinukleotidi-fosfaatti
$O_2$	Happi
$P_{H\ddot{A}VI\ddot{O}}$	LEDin häviöteho
$P_r$	Punaisen valon intensiteetti
$P_{fr}$	Kaukopunaisen valon intensiteetti
PAR	Photosyntetic active radiation - Fotosynteettisesti aktiivinen säteily
PPF	Photosyntetic photon flux – Fotosynteettinen fotonivuo
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
R	Fotosynteettisen fotonivuon ja irradianssin välinen suhteutuskerroin
$R_{j-c}$	LEDin kotelon ja sirun välinen lämpöresistanssi
$T_{j-c}$	LEDin kotelon ja sirun välinen lämpötila-ero
$T_{jakso}$	Tasasuunnatun verkkovirran jaksonaika
$U_{AC-DC}$	Tasasuuntaussillan häviöjännite
$U_J$	LEDin kynnysjännite
$U_{min}$	Päävirtalähteen minimijännite
$U_{p-p}$	Jännitteen vaihtelu huipusta-huippuun arvona
$U_{rms}$	Vaihtojännitteen tehollisarvo ennen tasasuuntausta



# 1 Johdanto

Valaistustekniikka on kehittynyt merkittävästi tehoLEDien tultua markkinoille. Loistodiodien (LED) valotehokkuus on kasvanut erittäin paljon viimeisen vuosikymmenen aikana ja samalla hinnat ovat merkittävästi laskeneet. LEDien käyttö valaistustekniikassa lisääntyy tulevaisuudessa merkittävästi.

Kasvit vaativat aivan omanlaisensa valaistuksen. Kasvien hyvinvointi riippuu monesta tekijästä, ei riitä vain, että kasvilla on paljon valoa ja sen mukanaan tuomaa lämpöä. Valaistuksen määrä ja laatu ovat keskeisimmät tekijät, mutta myös muita tekijöitä kasvin hyvän kasvamisen ja valaistuksen välillä on havaittu.

Suomessa on 4,3 miljoonaa neliometriä lämmitettyä kasvihuone-alaa, joissa käytetään arviolta 220 000 suurpainenatrium (HPS)-lamppua. [1] Tämän valaistuksen korvaaminen LEDeillä on tulevaisuudessa erittäin suuri mahdollisuus. Maailmanlaajuisesti käyttökohteita kasvien LED-valaistukselle on runsaasti.

Tämä diplomityö on osa Suomen Akatemian rahoittamaa tutkimushanketta ”New Lighting Methods to Regulate Plant Development”, jonka tarkoituksena on selvittää punaisen, kaukopunaisen ja sinisen valon vaikutusta kasveille. Tutkimusosapuolet ovat Helsingin yliopiston Sovelletun biologian laitos ja Teknillisen korkeakoulun Valaistusyksikkö. Tutkimuksessa käytetään kohdekasvina mansikkaa, *Fragaria vesca* L. Mansikka on erityisen kiinnostava tutkimuskohde sen oletetun poikkeavuuden standardikasviin, lituruoho *Arabidopsis thaliana* L., nähden.

LEDeillä pystytään hyvin kontrolloimaan valon määrää ja laatua. Erittäin kapeiden aallonpituusalueiden ansiosta valon laadun kontrollointi on helppoa. Lisäksi etuna on mahdollisuus sijoittaa valaistus hyvin lähelle kohdetta pienten valonpisteiden ja säteilyn hyvin pienen lämpökuorman ansiosta.

Diplomityössä oli tavoitteena kehittää mansikan tutkimiseen soveltuva LED-valaisin. Valon spektri eli käytettävät valon aallonpituudet olivat keskeisimmät parametrit yhdessä halutun valon määrän kanssa. Työn ensimmäisessä osassa selvitettiin kirjallisuudesta valon ja kasvin välisiä ominaisuuksia. Työn toisessa osassa suunniteltiin valaisimen valonjako sekä valaisimen mekaaninen ja sähköinen rakenne. Työn kolmannessa osassa

kuvattiin valaisimen rakentaminen. Viimeisessä osassa valaisin testattiin ja mitattiin. Syksyllä 2008 on tarkoituksena tehdä Viikin puutarhalla käyttökokeet, joissa Helsingin Yliopisto tutkii valon vaikutuksia kasveille.

## 2 Kasvien ja valon yhteys

Kasveille valo on ensisijaisesti energian lähde. Toisaalta kasvit saavat valon kautta paljon informaatiota ympäröivästä ympäristöstä ja olosuhteista. Kasvit muuttavat kasvamistaan ja elämistään voimakkaasti valon tuoman informaation seurauksena. Kasvit pystyvät hyödyntämään myös laajemman kaistan valosta kuin ihmisen silmä. Kasvien ”biologinen ikkuna” ulottuu 300 nanometristä (nm) aina 1000 nm asti. Biologisella ikkunalla tarkoitetaan aallonpituusaluetta valon spektrissä, jonka kasvi pystyy hyödyntämään.

### 2.1 Kasvien valosäteilyn käyttömekanismit

Kasveilla on kolme eri mekanismia valon hyödyntämiseen: Fotosynteettiset järjestelmät, kasvikromaattiset valojärjestelmät ja kryptokromaattiset järjestelmät.

**Fotosynteettisistä järjestelmistä** voidaan käyttää myös termiä yhteyttäminen. Tämä osa-alue kasvien toiminnasta on kaikkein parhaiten tunnettu. Järjestelmän tarkoituksena on muuttaa valosta saatava energia kasveille sopivampaan muotoon. On tunnettua, että kyseistä tehtävää kasveissa suorittavat vastaanottajapigmentit kuten klorofyllit ja karotenoidit. Tämä järjestelmä pystyy ottamaan energiaa talteen hyvin laajalta (300-1000nm) kaistalta valoa ja pääasiallinen parametri energian tuottamisen kannalta on valon määrä eli valokvanttien määrä. Myöhemmin selvitetään kuinka tämä järjestelmä reagoi eri aallonpituuksiin valossa ja kuinka se otetaan huomioon kasvivalotusta mitattaessa. [2]

**Kasvikromaattiset järjestelmät** tuovat kasveille informaatiota ympäristöstä. On tunnettua melko hyvin mitkä pigmentit reagoivat ja kuinka se vaikuttaa kasviin. Vielä ei kuitenkaan tunneta ensisijaista siirrosmekanismia eikä myöskään sen jälkeisiä aineen-

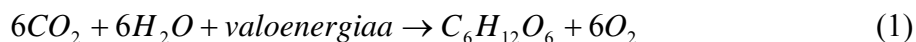
vaihduntatapahtumia. Järjestelmä monitoroi valon punaisten ja kaukopunaisten aallonpituuksien suhdetta. Näiden avulla kasvi pystyy määrittämään ajoituksen valon jaksollisuudelle ja järjestelmä kykenee osittain myös mittaamaan valon määrää. [2]

**Kryptokromaattiset järjestelmät** reagoivat ensisijaisesti siniseen valoon. Järjestelmä on aiemmin tässä luvussa lueteltuihin nähden selkeästi monimutkaisempi ja vaikutukset eri kasvien välillä ovat hyvin laajasti erilaisia. On tunnettua, että järjestelmä voi vaikuttaa kasvin rytmin muodostukseen, kasvin suuntautumiseen paikassa, varren kasvuun kuten myös kasvin avautumiseen. On myös havaittu, että vaikutukset riippuvat suuresti valon määrästä, joten järjestelmä monitoroi samalla valon määrää, laatua, suuntaa ja periodisuutta. [2]

## 2.2 Yhteyttäminen

Yhteyttämisessä epäorgaanisessa muodossa otetut aineet sidotaan orgaanisiin yhdisteisiin. Merkittävin yhteyttämisreaktio on hiilidioksidin yhteyttäminen. Yhteyttämisellä kasvit pystyvät sitouttamaan itseensä energiaa sopivassa muodossa. [3]

Mikäli yhteyttämisprosessiin käytetään valoenergiaa, puhutaan fotosynteesistä. Fotosynteesiä pidetään kasvien selviytymisen kannalta kaikkein tärkeimpänä prosessina. Myös yhteyttämisessä vapautuva happikaasu on elollisen elämän perustarpeita. Fotosynteesi on monivaiheinen reaktio, joka lähtöaineista lopputuotteisiin menee kaavan 1 mukaisesti. [3]



missä

$CO_2$  on hiilidioksidi

$H_2O$  on vesi

$C_6H_{12}O_6$  on rypälesokeri

$O_2$  on happi.

Fotosynteesi jakautuu kahteen osaan, valo- ja pimeäreaktioihin. Ensimmäisenä tapahtuvat valoreaktiot, joissa osa valoenergiasta sitoutuu adenosiinitrifostaatti (ATP)-molekyyleihin, nikotiinadeniinidinukleotidifosfaatti (NADPH)-molekyyleihin ja osa käytetään veden hajottamiseen vedyksi ja hapeksi. Tässä vaiheessa se osa hapesta, mitä kasvit eivät tarvitse omaan soluhengitykseensä, poistuu kasvista.

Pimeäreaktiot tapahtuvat valoreaktioiden jälkeen. Reaktiota kutsutaan pimeäreaktioiksi, koska ne eivät tarvitse toimiakseen valoenergiaa. Kuitenkin reaktiot vaikuttavat toisiinsa siten, että myöskään pimeäreaktioita ei synny kuin valoisassa ympäristössä. Valoreaktioissa ATP- ja NADPH-molekyyleihin sitoutunutta kemiallista energiaa ja vetyä, siirtyy pimeäreaktioihin, joissa hiilidioksidi tulee mukaan reaktioon ja lopputuotteena syntyy rypälesokeria. Joissakin kasveissa voi syntyä myös ruoko- tai hedelmäsokeria. Pimeäreaktioissa eli Calvinin kierrossa kasvi muuttaa ATP- ja NADPH-molekyylit adenosiinidifosfaatiksi (ADP) ja nikotiinadeniinidinukleotidifosfaatti-ioneiksi (NADP<sup>+</sup>). Tässä vaiheessa kasville vapautuu energia, jota se voi käyttää kasvuunsa. Calvinin kierrosta ADP ja NADP<sup>+</sup> palaavat takaisin valoreaktioihin. [3]

Fotosynteesi vaatii toimiakseen oikean väristä valoa, hiilidioksidia, sopivan lämpötilan ja vettä. Fotosynteesin kannalta tehokkainta on punainen valo. Silmälle herkintä vihreää ja keltaista valoa kasvit pystyvät käyttämään heikosti yhteyttämiseen. Usein valoa on päivällä riittävästi fotosynteesiin, ja kasvit eivät pysty kaikkea saamaansa valoa hyödyntämään. Hiilidioksidia on ilmassa harvoin liikaa. Siksi usein kasvihuoneissa kasvun tehostamiseksi hiilidioksidia tuotetaan lisää esimerkiksi polttamalla propaania. Useilla kasveilla fotosynteesi on mahdollista jo -5 °C -lämpötilassa. Kasvin kannalta fotosynteesi tehokkainta on +20 °C -lämpötilassa. [3]

On olemassa kasveja, jotka pystyvät tuottamaan energiaa kasvin tarpeisiin ilman valoenergiaa. Tätä prosessia kutsutaan kemotsynteesiksi. Näitä ovat jotkut merenpohjassa elävät kasvit, joille ei valoa ole edes saatavissa. Kyseisten kasvit ottavat energiansa kemiallisesti, hapettamalla epäorgaanisia aineita. [3]

## 2.3 Valon parametrit

Valon parametrit voidaan jakaa neljään eri osioon, joilla jokaisella on oma vaikutuksena kasveille. Valon määrä, spektri, suunta ja periodisuus ovat kaikki merkittäviä tekijöitä kasvien menestymiselle. Tässä luvussa selvitetään mainitut valon ominaisuudet ja kuinka ne vaikuttavat kasveihin.

### 2.3.1 Irradianssi

Kasvit tarvitsevat tietyn määrän valoa. Vuonna 1976 Björn havaitsi kasvien eri mekaniismien vaativan eri määrän valoa toimiakseen. Fotosynteesi on kaikkein vaateliain irradianssin suhteen. Fotosynteesi käynnistyy vasta noin  $10 \text{ W/m}^2$  irradianssilla, mutta toisaalta yli  $200\text{--}300 \text{ W/m}^2$  irradianssia eivät kasvit pysty enää hyväksi käyttämään, vaan fotosynteesimekanismi saturoituu. [2]

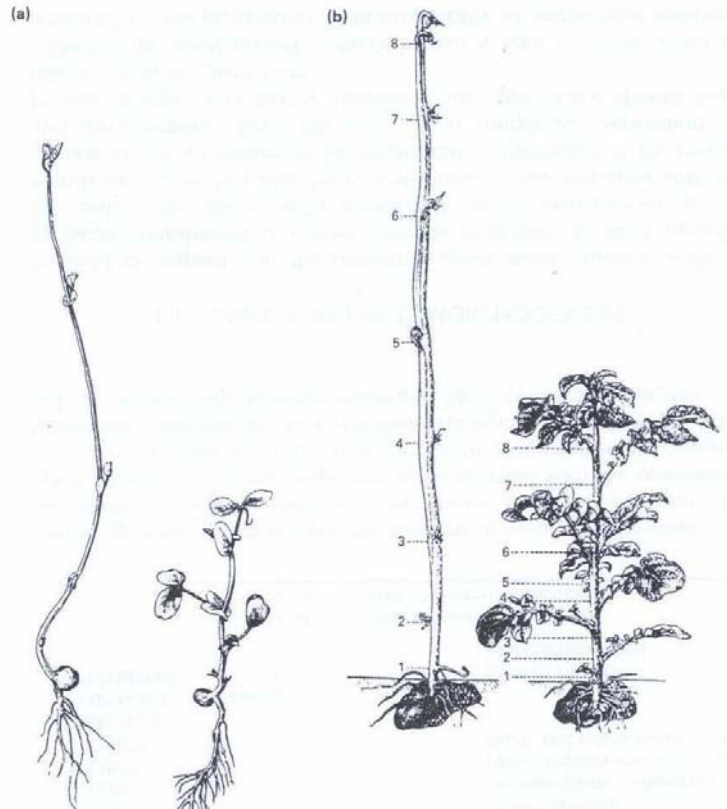
Björnin tutkimuksen mukaan kasvin kukkiminen vaatii noin  $1 \text{ W/m}^2$  irradianssin ja kasvien kyky suunnata kasvunsa kohti valoa vaatii valolta ainoastaan  $0,001 \text{ W/m}^2$  irradianssin. Vertailuna voidaan todeta, että pilvisenä päivänä ulkoilmassa irradianssi on noin  $100 \text{ W/m}^2$  ja ihmissilmä pystyy näkemään musta-valkoisesti  $0,0000001 \text{ W/m}^2$  ja värejä  $0,0001 \text{ W/m}^2$  irradianssissa. [2]

Valon määrän tarvetta kasville voidaan tarkastella kasvin käyttäytymisen perusteella. Monet kasvit kykenevät selviytymään hankalammistakin kasvuolosuhteista muokkaamalla kasvuaan siten, että valon saanti varmistuu.

Kuvassa 1 on esitetty valon määrän vaikutus herneen (a) ja perunan (b) kasvuun. Molemmilla kasveilla on huomattavaa, että mikäli valoa on vähän, kasvit pyrkivät pidentämään varttaan. Näin on kasvulla esimerkiksi mahdollisuus saada valoa, vaikka läheisyydessä olisikin jokin matalalla oleva este valolle. Toisaalta on huomattavaa, että mikäli valoa on riittävästi, kasvi kasvaa vain sen verran, että sen omille lehdille on tilaa. Valon määrä edistää selkeästi lehtien kasvamista, mikä on kuvasta huomattavissa.

Valon ja varjon määrä vaikuttaa kasvien käytökseen. Kuvan 2 kohdassa a on voikukan kasvussa selkeä ero sen mukaan lankeaako kasviin varjoja vai ei. Kuvassa vasemmalla

olevaan kasviin lankeaa varjo ja kasvit ovat kasvaneet ylöspäin suuntautuen. Jos taas kasvulla ei ole ympärillään mitään valon tiellä, ei kasvulla ole tarvetta kasvaa ylös, vaan se kasvaa maata myöden. Valon määrä vaikuttaa siis huomattavasti kasvin elinmahdollisuuksiin kuten myös kasvuun.



Kuva 1. Valon määrän vaikutus herneen ja perunan kasvuun. [2] Vasemmalla herneen verso vähävaloisessa ja runsasvaloisessa paikassa. Oikealla vastaavat perunan varret.

Varhaiset tutkimukset on tehty käyttäen radiometrisiä voimakkuuksia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) valolle. Nykyään käytetään ensisijaisesti fotosynteesin fotonivuohon (PPF) perustuvia mittayksiköitä. Järjestelmässä jokaisella fotonilla on yhtäläinen painoarvo. Perusyksikkönä on mikromooli per neliometri per sekunti ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ). Fotonit sisältävät eri määrän energiaa riippuen valon aallonpituudesta. Stark-Einstein-lain mukaan absorboitunut kvantti voi virittää vain yhden molekyylin. [4] Yhtälöstä

$$E_{mol} = N_A \times h \times f \quad (2)$$

missä

$E_{mol}$  on yhden moolin energia

$N_A$  on Avogadron vakio ( $6,02 \cdot 10^{23}$ )

$h$  on Planckin vakio ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  Js)

$f$  on taajuus, joka on valon nopeus jaettuna aallonpituudella ( $f=c/\lambda$ )

nähdään energian ja säteilyn taajuuden välinen riippuvuus. Vuonna 1988 Hart [3] julkaisi PPF:n ja irradianssin välisen yhtälön

$$E_p = \frac{\lambda}{N_A \times h \times c} E_e = \frac{E_e}{E_{mol}} \quad (3)$$

missä

$E_p$  on fotosynteettinen fotonivuo

$E_e$  on irradianssi

$\lambda$  on aallonpituus

$c$  on valon nopeus.

Yhtälöstä 2 voidaan laskea kerroin

$$R = \frac{\lambda}{N_A \times h \times c} \quad (4)$$

missä

$R$  on fotosynteettisen fotonivuon ja irradianssin välinen suhteutuskerroin.

jonka avulla voidaan korjata säteilyenergiaan perustuvat laskelmat vastaamaan kasvien käyttäytymistä paremmin kuvaavaa PPF- arvoa.

### 2.3.2 Valon laatu

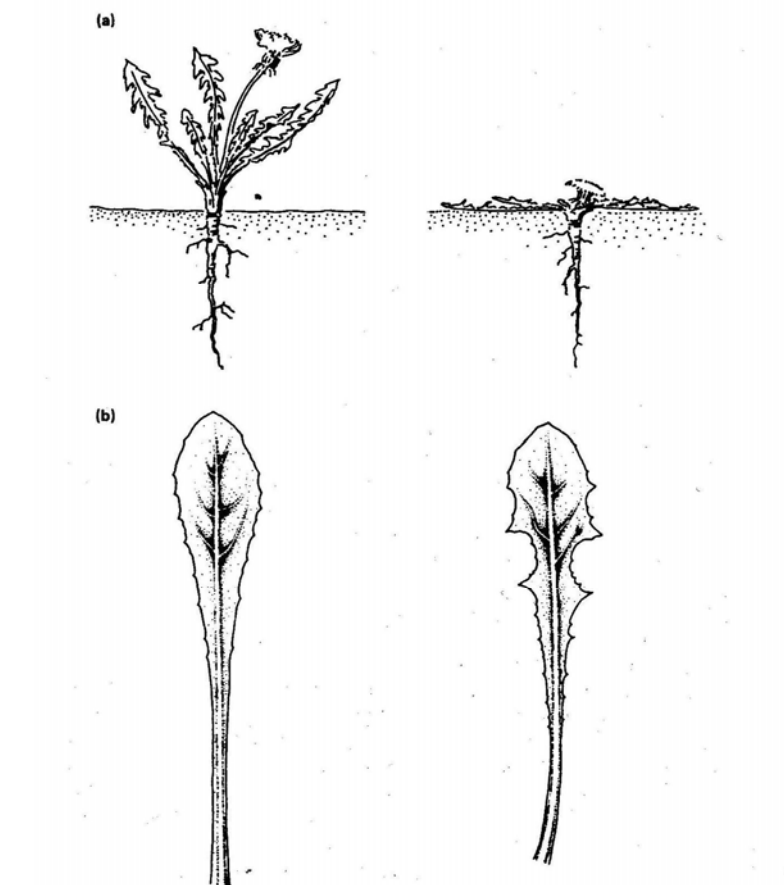
Valon laadulla tarkoitetaan valon spektriä. Valon spektri kuten määräkin on merkittävä asia kasveille. Valon spektri kertoo kasville paljon ympäristön tilasta. Kasville on hyvin tärkeää, kuinka se pystyy käyttämään valon spektrin eri osia. Kasville valon tehokkuus on samalla tavalla eri aallonpituuksista riippuvaista kuin ihmissilmäkin. Kasvin spektrin herkkyys ei vastaa ihmissilmän spektristä herkkyyttä ja kasvin solut pystyvät hyödyntämään suuremman kaistan valosta kuin ihmissilmä. Kasvien tunnettu ”biologinen ikkuna” ulottuu 300 nanometristä aina 1000 nanometriin saakka.

Toinen näkökanta on valon eri spektraalisten osien vaikutus. Kuten jo aiemmin mainittua, valo välittää kasville suuren määrän informaatiota ympäristöstä. Hyvänä esimerkkinä valon laadun vaikutuksesta kasviin voidaan tarkastella kuvan 2 kohtaa (b). Kuvassa oikean puoleista kasvia on valotettu 10 tuntia päivässä normaalilla valkoisella valolla. Vasemman puoleiseen kasviin on pyritty vaikuttamaan varjonomaisella valaistuksella ja valotuksen päätteeksi kasvia on valotettu 700–900 nm valolla. Varjovaikutuksella on saatu aikaan voikukan lehtien kasvaminen täysinäisiksi.

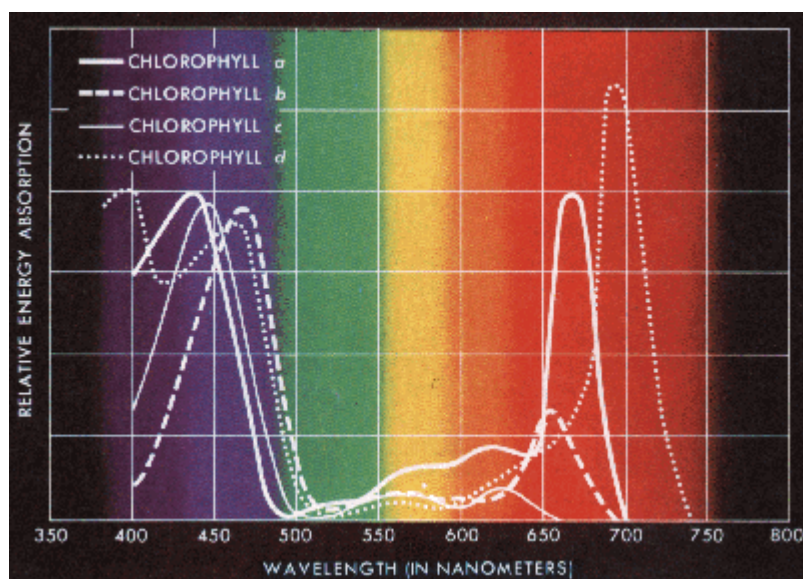
Tutkimuksissa valon punaisen värin ( $<700\text{nm}$ ) ja kaukopunaisen (700-900nm) suhde on osoittautunut merkittäväksi kasvia ohjaavaksi tekijäksi. Kasvikromaattiset järjestelmät kasvissa pystyvät havaitsemaan valon  $P_r$  (punaisen valon intensiteetti) ja  $P_{fr}$  (kaukopunaisen valon intensiteetti) suhdetta ja siten antamaan kasville tarvittavaa tietoa esimerkiksi päivän pituudesta ja rytmistä. [2]

Kasvien ja valon välistä käyttäytymistä tutkittaessa on huomattu, että kasveilla on selkeitä resonansseja eri valon aallonpituuksilla, kasvien pigmentit reagoivat eri valon aallonpituuksiin eri tavalla. Kuvassa 3 nähdään selkeästi kasvien pigmenttien herkkyys valon eri aallonpituuksille. Tässä diplomityössä keskitytään klorofyllien a ja b vaikutuksiin mansikassa.. Tutkimuksessa selvitetään myös mahdollinen kaukopunaisen valon punaisen valon vaikutuksia kumoava vaikutus. [2,5]





Kuva 2. Varjon vaikutus voikukan kasvuun. Kohdassa (a) voikukka vasemmalla varjoisessa ja oikealla vähävarjoisessa paikassa. Kohdassa (b) vastaava vaikutus lehtiin. [2]

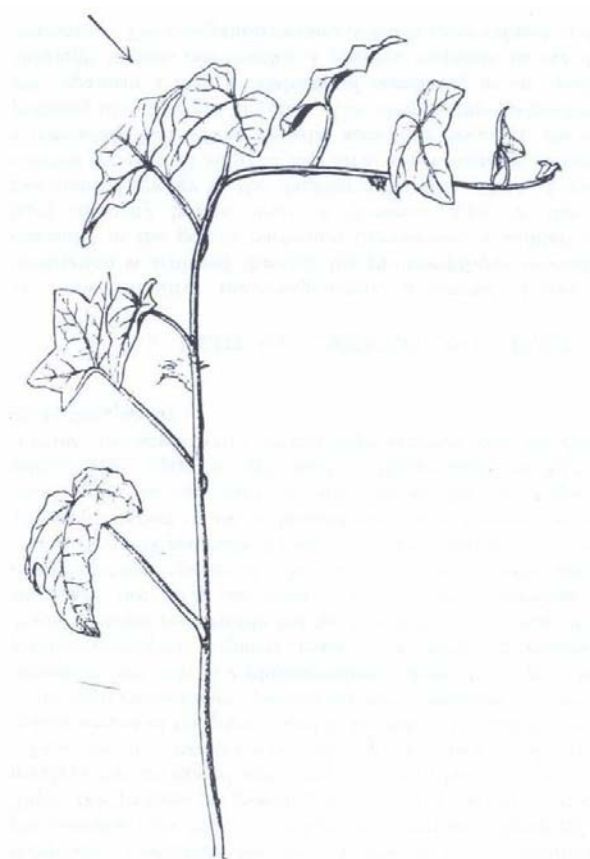


Kuva 3. Eri pigmenttien spektriherkkyyskäyrät. [5]

### 2.3.3 Valon suunta

Valon suunnan merkitys on yksinkertaisempi kuin aiemmin kuvattujen valon ominaisuuksien. Valon suunnan pitää olla kyseiselle kasville edullinen. Jos valoa on saataville, osaavat monet kasvit ohjata kasvun sellaiseksi, että ne pystyvät elämään. Aina kasvit tai niiden osat eivät tarvitse saati pyri saamaan maksimaalista määrää valoa. Tietty kasvit tai niiden osat viihtyvät paremmin vähemmässä valossa. [2]

Kuvassa 4 on esitetty muratti-kasvi ja nuolella kuvattu valon suunta. Kasvin varsi pyrkii tietoisesti pois valosta, kun taas lehdet pyrkivät kohti valoa. Kasvit siis määrittävät omaa kasvuaan varsin voimakkaasti sen mukaan mikä on niille edullisinta. Valon suunnan vaikutus riippuu voimakkaasti kasvityypistä. [2]

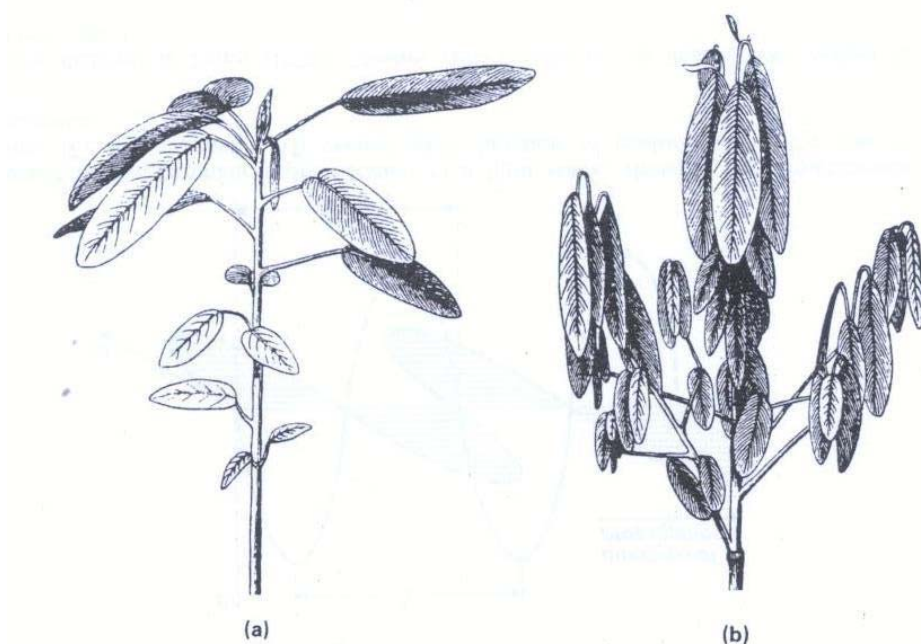


Kuva 4. Valon suunnan merkitys murattikasviin. Pääosa valosta saapuu nuolen suunnasta. Kasvi suuntaa lehtensä kohti valon tulosuuntaa ja varren kasvun pois päin valosta. [2]

### 2.3.4 Valon periodisuus

Valon periodisuus on kasvin sisäinen kello ja kalenteri. Kasvi pystyy määrittämään valon periodisuudesta vuorokauden ja vuoden ajan. Kasveille on tärkeää tietää nämä ajalliset informaatiot.

Lyhyt periodisuus eli päivän ja yön vaihtelu. Valon spektristä  $P_r : P_{fr}$  suhde ja sinisen valon määrä kertoo kasville vuorokauden ajan. Koska yöllä ei ole tarvetta kerätä valoa, laskevatkin monet kasvit lehtensä alas ja keskittyvät energian säästämiseen ja käyttävät energiansa kasvuun. Kuvassa 5 kasvi on päivällä terhakkaana ja yöllä lehtensä laskeutuneena. Eri kasvit käyttäytyvät eri tavalla, osa soveltuu pitkään päivään paremmin ja toisaalta on kasveja, joille lyhyt päivä sopii paremmin. Vain ja ainoastaan kun päivän pituus on niille sopiva, ei liian pitkä tai lyhyt, kasvit voivat kukkia. Muulloin kasvit vain kasvavat eivätkä kuki. [2]



Kuva 5. (a) Kasvi päivällä. Päivällä kasvi pitää lehtensä ylhäällä helpomman valon saannin takia. (b) Yöllä, pimeällä kasvi säästää energiaa pitämällä lehdet alhaalla. [2]

Pitkän ajan periodisuus eli vuodenaikojen vaihtelu. Samat pigmentit tekevät mittaustyön kuin lyhyessä periodisuudessa. Kasveille kaikkein tarkin menetelmä pitkän periodin

indikointiin on juuri valo eikä esimerkiksi lämpötila. Lämpötila voi vaihdella voimakkaasti eri kausien aikana, valon määrä ja spektri ei juurikaan. Menetelmän ansiosta monet kasvit voivat talvella vähäisen valon määrän aikaan keskittyä paremmin kasvamiseen ja energian säästöön kukkimisen sijasta, koska valoa ei ole tarjolla kukkimisen kannalta tarpeeksi ja näin kasvi pystyy talvehtimaan. [2]

## 3 Valaisinten suunnittelu

### 3.1 Suunnitteluperiaatteet

Suunnittelun päälinjat määrää selkeästi tutkimussuunnitelma. Tutkimussuunnitelma määrittää aallonpituudet (460, 660 ja 735nm) joita tarvitaan sekä vaaditun valon määrän ( $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2, \text{s}$ ). Lisäksi vaaditaan säädettävyyttä valolle.

Suunnitelman määäämien rajojen puitteissa pyritään suunnittelemaan ja toteuttamaan valaisimet, joissa

- Otetaan kasvin vaatimukset suunnittelussa kunnolla huomioon.
- Toteutuu LEDien vaatimat erityisominaisuudet valaisimessa. Näitä ovat jäähdytyksen erityinen huomioiminen ja ympäristön vaikutus LEDeihin.
- Valon jaon tulee olla mahdollisimman tasainen valaistulla kohdetasolla.
- Mekaaninen ja valotekninen muunneltavuus on riittävä.

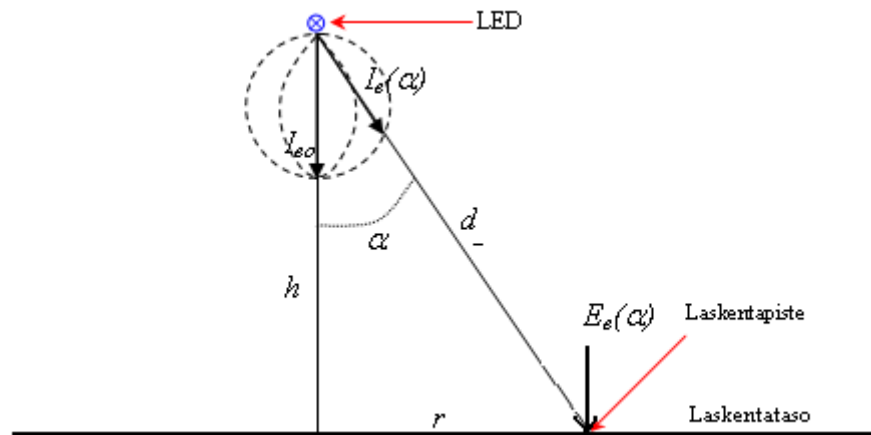
Tutkimuskäytössä valaisin tulee olemaan vuoden 2011 loppuun saakka, joten kestävyys, toiminnallisuus ja kustannukset ovat tärkeitä arvoja.

Suurin vaikutus valaisimen suunnittelun haasteisiin ja ennen kaikkea kustannuksiin tulee olemaan valaisimen sijoituskorkeudella. Sijoituskorkeudeksi sovittiin 1 metri. Metrin korkeus on LED -valaisimelle suuri, mutta ratkaisulla saavutetaan mahdollisuus käyttää valaisinta myös kasvatustarkoituksiin, joissa on tarpeen suurempi valon määrä. Kasvin kasvunsäätelytarkoituksiin riittäisi hyvin myös 30 cm korkeus. Lähes joka osalla 30 cm sijoituskorkeuden kasvattaminen 1 metriin nostaa kustannukset ja suunnitteluhaasteet noin kymmenkertaisiksi. Lisääntynyt LEDien määrä ja kokonaisteho kasvattavat paitsi LED-kustannuksia myös tehonsyöttötarpeita, jäähdytystarvetta ja asettaa rakenteelle paljon suuremmat kestävyysvaatimukset. Näistä jokainen on rahallisesti suuri investointi, mutta samalla valaisimelle saadaan monipuolisempi käyttöalue suuria intensiteettejä vaativien kasvatuskokeiden muodossa.

## 3.2 Valon määrään liittyvä suunnittelu

### 3.2.1 Irradianssin laskentaperiaatteet

Valaisimen suunnittelu alkaa valon määrän ja jakautumisen laskennalla. Periaatteena on, että laskenta suoritetaan ensin energian mukaan, joka lopuksi korjataan vastaamaan PPF -yksiköitä.



Kuva 6. Irradianssin laskenta pisteeseen tasolla. [6]

Pinnalla olevaan pisteeseen lankeava säteilytysvoimakkuus määritellään käyttäen käännteistä neliölausetta ja kosinilausetta. [6] Säteilytysvoimakkuus määritellään seuraavasti:

$$E_e(\alpha) = \frac{I_e(\alpha)}{d^2} \quad (5)$$

missä

$E_e(\alpha)$  on irradianssi pisteeseen

$d$  on etäisyys valon lähteen ja laskentapisteen välillä

$I_e(\alpha)$  on säteily tiettyyn kulmaan, joka voidaan määritellä seuraavasti:

$$I_e(\alpha) = I_{eo} \times \cos^{(g-1)} \alpha \quad (6)$$

missä

$I_{eo}$  on säteilyn maksimi-intensiteetti

$\alpha$  on kulma maksimi-intensiteetin ja laskentapisteesen johtavan suunta-vektorin välillä

$g$  on suuntaavuuskerroin, joka määritellään yhtälöllä [6]

$$g = 1 + \frac{\ln(0,5)}{\ln\left(\cos\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (7)$$

missä

$\varphi$  on valonlähteen avautumiskulma.

Yhtälö 6 pätee ainoastaan lambertiaaniselle valon jaolle. Säteilyn maksimi- intensiteetti on helpointa poimia laskentaa varten LED-valmistajan ohjelehdessä. Yhtälöistä 5 ja 6 voidaan johtaa lopullinen yhtälö säteilyvoimakkuudelle tiettyyn pisteeseen, joka on

$$E_e(\alpha) = \frac{I_{eo}}{d^2} \times \cos^{(g-1)} \alpha . \quad (8)$$

Yhtälöstä 7 saadaan yhtälön 3 avulla haluttu fotometrinen fotonivuo  $E_p$ , jota käytetään tärkeimpänä suunnitteluparametrina:

$$E_p(\alpha) = \frac{\lambda \times I_{eo}}{0,1197 \times d^2} \times \cos^{(g-1)} \alpha \quad (9)$$

missä

$E_p$  on fotosynteettinen fotonivuo (PPF)

### 3.2.2 Irradianssin simulointi

Varsinainen laskenta tehtiin Matlab -ohjelmistolla. Edellisessä luvussa johdettujen kaavojen avulla kirjoitettiin lyhyehkö komentokielinen ohjelma, jonka avulla voidaan mielivaltaisella ledien sijoituksella laskea irradianssinjakautuminen halutulla laskentatasolla. Pääperiaatteena suunnittelussa oli kokeilla useita erilaisia sijoituksia LEDeille, joista valikoidaan paras ratkaisu.

Jo suunnittelun alkuvaiheessa valikoitui hinnan ja säteilyintensiteetin perusteella LEDit joita käytetään valaisimessa. LEDit valmistajan lupaamin suoritusarvoin [7-9] on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kasvivalaisimen LEDit suoritusarvoineen [7-9].

Aallonpituus (nm)	Valmistaja ja malli-numero	Jännite (V)	Maksimivirta (mA)	Säteilyteho (mW)	Ottoteho (W)	Aukeamiskulma(°)	Maksimi säteily-intensiteetti(mW/sr)
735	Epitex L735-66-60	9	750	1000	7,8	120	450
660	LEDEngin LZ110R205	3,2	1000	450	3	90	245
460	Seoul D32282	4	700	510	3	130	141

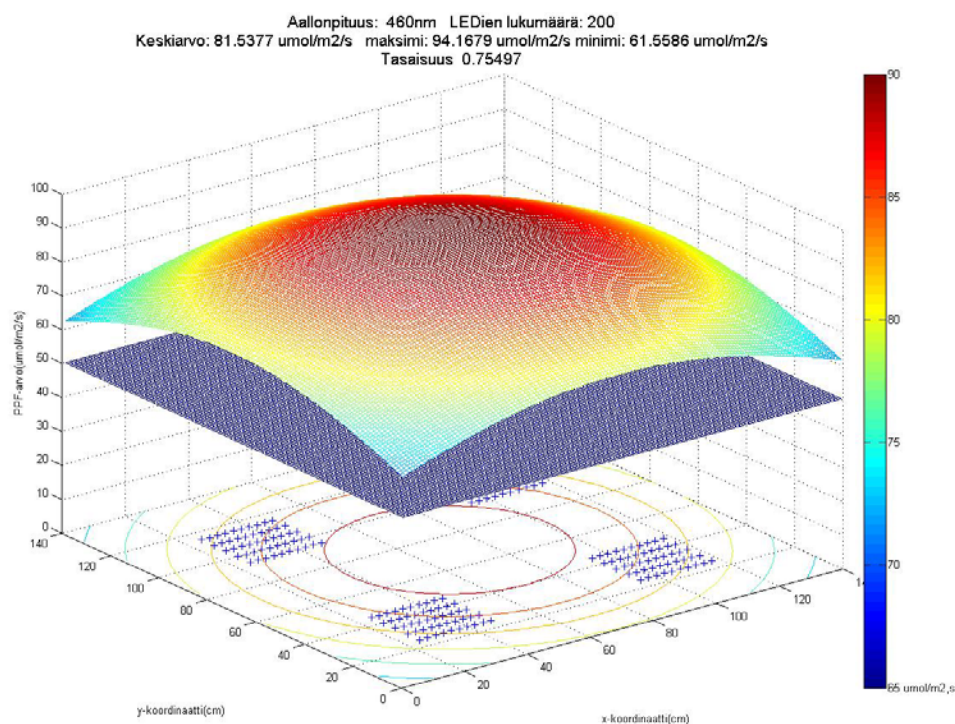
On huomattavaa, että kaikissa LEDeissä on melko suuri avautumiskulma ja valon jako on lambertianista.

Jo ensimmäisistä simuloinneista lähtien oli hyvin selvää, että joudutaan tekemään kompromissi irradianssin ja tasaisuuden välillä. Varsin suuresta sijoituskorkeudesta johtuen LEDien sijoitus valaistavan alueen laidoille tuo tasaisimman valon jaon, mutta samalla säteilyn PPF- keskiarvo valaistavalla alueella vähenee. Toisaalta valaisimen keskelle sijoitetut LEDit saavat aikaan varsin suuren keskiarvon säteilytyksen määrälle, mutta samalla valon tasaisuus heikkenee. Samat ilmiöt toistuvat vaikka käytettäisiin hyvinkin monimutkaisia LEDien sijoituksia.

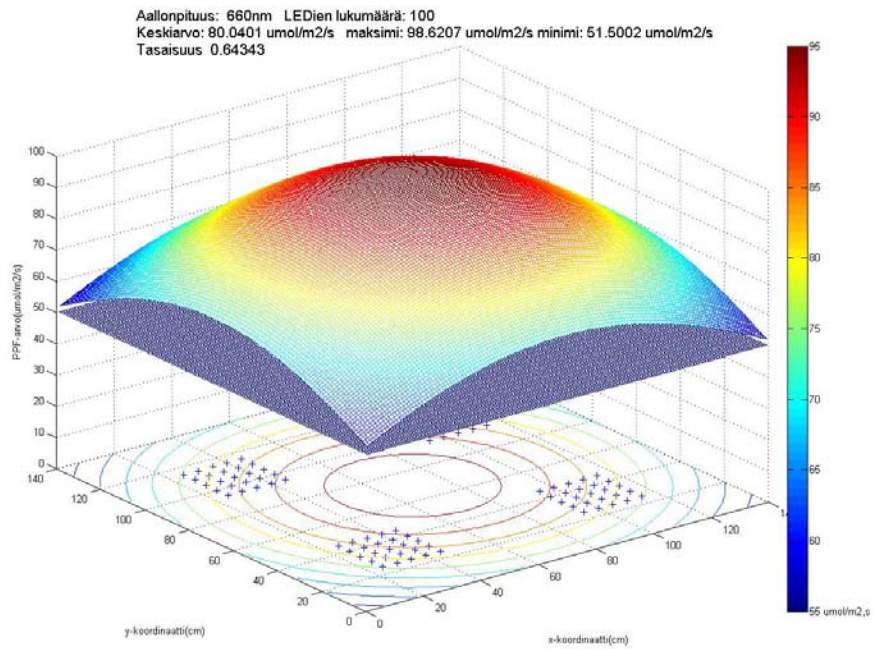
Lopulta suunnittelussa päädyttiin jakamaan valaisimen LEDit melko tiivisiin ryhmiin. Kyseinen ratkaisu tuo etuja mekaanisessa, lämpöön liittyvässä ja sähkön syöttöön liittyvässä suunnittelussa. Niistä enemmän seuraavissa kappaleissa. Lopulliset simuloinnin tulokset on esitetty kuvissa 7, 8 ja 9.



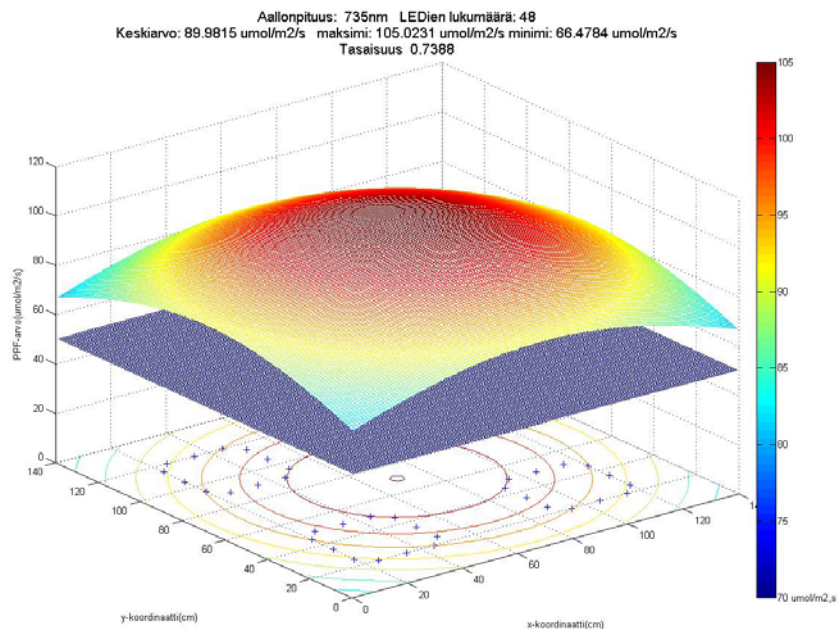
Kuvista nähdään, että valaisimen, jossa on 660 nm LEDit antama tasaisuus, on hieman heikompi (0,64) kuin valaisimen, jossa on 735nm (0,74) ja 460 nm (0,75) LEDit. Tämä johtuu siitä, että 660 nm LEDeissä on kapeampi aukeamiskulma, josta johtuen säteilytysvoimakkuus pienenee alueen reunoille mentäessä. Tämä ei aiheuta ongelmaa tässä käytännön asennuksessa, johtuen siitä, että laskenta on tehty 140x140 cm kokoiselle alueelle, joka on suunniteltua kasvatusalaa jonkin verran suurempi. Koska vaimenemisen jyrkkyys laitoja kohti on erittäin voimakasta, jättämällä laskennasta ulos 10 cm laidoilta, saadaan huomattavan paljon suurempi tasaisuus, laskennallisesti 72 %. Kuva-teksteihin merkattu aallonpituus tarkoittaa LED- valaisimen kyseiselle aallonpituudelle laskettua irradianssijakaumaa.



Kuva 7. LED- valaisimen (460nm) irradianssiarvot suunnittelutasolla. +- merkit kuvaavat LEDien sijoituspaikkoja. Sininen taso kuvaa tavoitetasoa ( $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Laskentakorkeus oli 1 metri.



Kuva 8. LED- valaisimen (660nm) irradianssiarvot suunnittelutasolla. +- merkit kuvaavat LEDien sijoituspaikkoja. Sininen taso kuvaa tavoitetasoa ( $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Lasketakorkeus oli 1 metri.



Kuva 9. LED- valaisimen (735nm) irradianssiarvot suunnittelutasolla. +- merkit kuvaavat LEDien sijoituspaikkoja. Sininen taso kuvaa tavoitetasoa ( $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Lasketakorkeus oli 1 metri.

### 3.3 Rakenteellinen suunnittelu

#### 3.3.1 Jäähdytys

LED-valaisimen suunnittelussa ei voi koskaan olla painottamatta jäähdytyksen kunnollista suunnittelua. Tässä valaisimessa suunnittelua helpottaa valaisimen jakautuminen selkeiksi ryhmiiksi. Ryhmiin jaolla voidaan laskentaa yksinkertaistaa symmetrian takia ja myös jäähdytysratkaisujen hahmottaminen on helpompaa. Yhden punainen-kaukopunainen-ryhmän kokonaisteho on

$$P_{tot} = \sum U_j \times I_D = (12 \times 9V \times 0,7A) + (25 \times 3,2V \times 1A) \approx 156W$$

missä

$U_j$  on LEDin kynnysjännite

$I_D$  on LEDin läpi kulkeva virta.

Jotta valaisin ei lämpenisi yli 60 °C huoneilmaa lämpimämmäksi, jota voidaan suunnittelijan kokemuksen perusteella pitää ehdottomana maksimina, tulee jäähdytyksen lämpöresistanssin olla alle 0,39 °C/W. Jäähdytyslementiksi valittiin Aavid Thermalloy'n [10] valikoimasta malli S586 250 mm pitkänä versiona. Perusteena valinnalle on lähes optimaalinen koko LED-ryhmälle ja riittävän alhainen lämpöresistanssi 0,43 °C/W. Jotta jäähdytys riittää vaikka valaisinta ajettaisiin täydellä teholla, päätettiin jäähdytystä vahvistaa vielä erillisellä puhaltimella jokaisen jäähdytyslementin päälle. Näin lämpöresistanssi saadaan pudotettua kolmannekseen ilman virtausnopeudella 2 m/s. [11] Todellisuudessa päästään vieläkin alemmas, koska puhaltimet kykenevät lähes 4 m/s ilman virtausnopeuteen.

LED-siru lämpee enemmän kuin muut osat valaisimessa. Tämä lämpeneminen riippuu sirun ja sitä ympäröivän koteloinnin lämpöresistanssista. Tämä resistanssi on tyypillisesti 8-10 °C/W. [7-9] Yhtälöllä

$$T_{j-c} = R_{j-c} \cdot P_{HÄVIÖ} \quad (10)$$

missä

$T_{j-c}$  on LEDin kotelon ja sirun välinen lämpötila-ero.

$R_{j-c}$  on LEDin kotelon ja sirun välinen lämpöresistanssi.

$P_{HÄVIÖ}$  on LEDin häviöteho.

voidaan arvioida, että sirun lämpötila on LEDin tehosta (3-5W) riippuen noin 30–40 °C suurempi kuin jäähdytys-elementillä. Jos oletetaan, että jäähdytys-elementti lämpenee täydellä valaisinteholla maksimissaan 60 °C ja sirun lämpötila on 40 °C tätä korkeampi, saadaan sirun lämpötilaksi normaaleissa 25 °C ympäristölämpötilaksi korkeintaan 125 °C mikä on vielä täysin hyväksyttävissä rajoissa. Valmistajat yleisesti sallivat LED-sirun lämpötilan olevan maksimissaan 150 °C.

### **3.3.2 Rakenteen kestävyys ja muunneltavuus**

Valaisimen käyttöikä tulee olemaan useita vuosia, joten rakenteen suunnittelussa pitää kyseinen asia huomioida. Rakenteen pitkäikäisyyteen vaikuttaa huomattavasti niin materiaalivalinnat kuin myös suunnitteluratkaisut. Rakenteessa ei tule käyttää liian heikkoja ja materiaalivahvuuksia ja ohuiden materiaalien kanssa käytetään rakennetta jäykistäviä tukia tai materiaalia muotoillaan siten, että saavutetaan riittävä jäykkyys.

Rakenteellinen suunnittelu tehtiin Solid Edge- ohjelmistolla. Käyttämällä todellisia mittoja ja huolellista mallinnusta, saadaan varmistettua osien mitoituksen yhteensopivuus ja samalla saadaan hyvää näkemystä myös lopullisesta ulkonäöstä. Mallinnuskuvien kanssa on helppoa tehdä rakenteeseen ulkonäöllisiä ja toiminnallisia muutoksia ja saman tien saada ohjelman tuoma palaute kokonaisuuden onnistumisesta.

Rakenteen muunneltavuus tulee esiin lähinnä valaisimen sijoituskorkeuden muuttamisessa. Valaisin voitaisiin toteuttaa moduuleina joiden korkeutta voisi erikseen muunnella. Toisaalta yhtenäinen jäykkä rakenne antaa käyttötarkoituksessa riittävän muunneltavuuden, jossa yleiskorkeuden muuttaminen on kaikkein helpointa.

### 3.3.3 Ympäristön vaatimukset

Valaisimen sijoituspaikkana olevassa kasvihuoneessa ylläpidetään 50–60 % suhteellista kosteutta. Tämä on hieman normaaleja ympäristöolosuhteita kosteampi, mutta kyseisessä kasvihuoneessa kasvit kastellaan altapäin, joten suhteellinen kosteus on alhainen verrattuna vanhemman teknologian kasvihuoneisiin nähden. On tunnettua, että erityisesti Alumiini-gallium-arseeni (AlGaAs)-LEDit ovat herkkiä ympäristön kosteudelle. [12] Kosteus voi lämpötilan vaihteluiden ansiosta tiivistyä myös LEDin linssin alle, mikä voi aiheuttaa ongelmia LEDin toimivuuden kannalta. Edellä mainitun ongelman ehkäisemiseksi valaisimien punaisten LEDien linssin ja rungon väliset saumat suojattiin lakalla.

Sähkösuunnittelussa tulee myös ottaa huomioon että vaadittavat IP-suojausluokat tulevat huomioitua. Lähinnä ongelmaksi voi koitua 230 V -kytkentöjen suojaaminen niin, että jännitteisiin paikkoihin ei voi koskea sormin. Myös mahdollisen roiskeveden huomioiminen on tehtävä huolella. Monet osat kestävät sellaisenaan roiskevettä hyvin, liitokset ja avojohdotuksen voivat koitua ongelmakohdiksi.

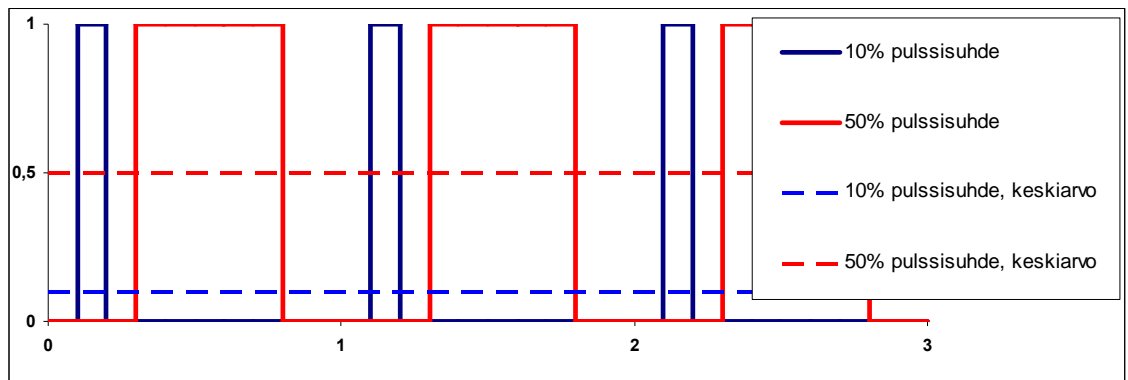
### 3.4 Sähkötekhninen suunnittelu

Tutkimussuunnitelman asettamat rajaehdot sähköistykselle rajoittuvat valon määrän säädettävyyteen. Valaisin suunnitellaan mahdollisimman luotettavaksi ja toimivaksi.

#### 3.4.1 Pulssinleveysmodulaatio (PWM)

LEDien valon määrän säätelyssä pulssinleveysmodulaatio on suositeltavin tapa. Virran amplitudin säätö on ongelmallinen, koska virtaa säädettäessä LEDien ominaisuuksiin kuuluu myös huippuaallonpituuden muuttuminen. Virran suora säätö on toki helpoin mahdollinen säätömenetelmä, mutta PWM-säätö on myös varsin yksinkertaista.

Pulssinleveysmodulaatiolla tarkoitetaan ohjaustapaa, jolla kuormaan menevän jännitteen keskiarvoa säädetään jännitettä päälle-pois-kytkennällä. Ohjaustavan etuna ovat erittäin pienet häviöt verrattuna esimerkiksi resistiiviseen jännitteen säätöön. Pulssinleveysmodulaatiossa säädetään pulssisuhdetta, joka tarkoittaa johtavan ajan suhdetta jaksonaikaan, eli johtavan ja ei-johtavan ajan summaan. Kuvassa 10 on kuvattu jännitteen aaltomuotoa 10 % ja 50 % pulssisuhdeella. Kuvissa on myös jännitteen keskiarvo.



Kuva 10. Pulssinleveysmodulaatio (PWM). Kuvassa on havainnollistettu pulssin leveyden vaikutusta keskiarvoon.

LEDeille pulssinleveysmodulaatio on erittäin sopiva. Johtuen puolijohteelle tyypillisestä noin 20 nanosekunnin (ns) nousu- ja laskuajasta, voidaan käyttää hyvinkin korkeataajuuksista modulaatiota ilman ongelmia värintoistossa. Monille muille valonlähteille, kuten hehku- ja halogeenilampuille, PWM- säätö aiheuttaa ongelmia virran jatkuvan päälle- pois- kytkennän takia. Toisaalta riittävän korkealla taajuudella, jolloin hehku- lanka ei ehdi jäähtyä ja kytkentävirtasysäystä ei synny, lamppujen elinikä kasvaa.

### 3.4.2 Virtalähteen toteutus

Valaisimen kokonaisteho tulee olemaan noin 620 W. Kun LEDeille halutaan syöttää säädettävää vakiovirtaa, on ilmeistä, että virran syötön rakentaminen on suuri haaste. Riittävän korkeaan jännitteeseen kykenevät vakiovirtalähteet ovat kalliita.

LEDien virransyötön ratkaisuksi käytettiin hyvin pieniä ja energiatehokkaita hakkuri-vakiovirtalähde-moduuleja. Tässä työssä käytetään BuckPuck (LEDynamics, Ranlolph, USA) - vakiovirtalähteitä [13]. Niiden etuna on melko edullinen hinta, sopivan pieni koko, saatavuus useille eri virta-arvoille ja mahdollisuus ohjata PWM -säädöllä. Kuitenkin näissäkin on melko rajoitettu syöttöjännite. Maksimissaan 32 V ulostulojännite saa aikaan sen, että virtalähteitä joudutaan käyttämään suuri määrä. Lopullisessa toteutuksessa niitä on 120 kpl. BuckPuck -virtalähteille tulee myös syöttää tasajännitettä, joka on aina vähintään 2 V suurempi kuin ulostulo-jännite, hakkurille varsin tyypillinen ominaisuus.

Päävirransyöttöä alettiin suunnitella hyvin peruskomponenteista, johtuen valmiiden virtalähteiden korkeasta hinnasta. Vaadittava, minimissään 23 V tasajännite tehdään 24 VAC toisiolla varustetulla rengassydän-muuntajalla, tasasuuntaussillalla ja suurella 22200 mikrofardin ( $\mu F$ ) tasauskondensaattorilla. Jännitteen vaihtelu on

$$U_{p-p} = \frac{I_{\max} T_{\text{jakso}}}{C} = \frac{8A \cdot 0,01s}{0,022F} = 3,63V$$

missä,

$U_{p-p}$  on jännitteen vaihtelu huipusta-huippuun arvona

$I_{\max}$  on virtalähteiden ottama maksimivirta

$T_{\text{jakso}}$  on tasasuunnatun verkkovirran jaksonaika

$C$  on tasauskondensaattorin kapasitanssi

Joten minimijännite päävirtalähteen ulostulossa on

$$U_{\text{MIN}} = U_{\text{rms}} \cdot \sqrt{2} - U_{\text{AC-DC}} - U_{p-p} = 24V \cdot \sqrt{2} - 1,2V - 3,6V = 29,1V$$

missä

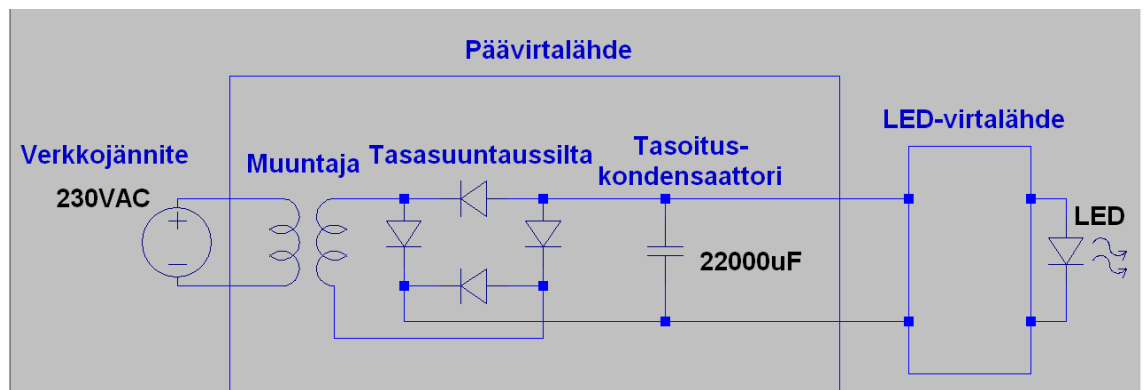
$U_{\text{min}}$  on päävirtalähteen minimijännite.

$U_{\text{rms}}$  on vaihtojännitteen tehollisarvo ennen tasasuuntausta.

$U_{\text{AC-DC}}$  on tasasuuntaussillan häviöjännite.

Laskennallisesti jännitteen pitäisi pysyä täydelläkin kuormalla riittävällä tasolla. LEDi- en virransyötön periaatekuva on liitteessä 1. Yksinkertaistettuna virransyöttö esitetään kuvassa 11.

Lisäksi lisälaitteet tarvitsevat virransyötön. Lisälaitteilla tarkoitetaan tuulettimia, virran ohjausta ja ajastusta. Suuremmat ongelmat vältetään sillä, että käytetään 230 VAC jännitteellä toimivia laitteita. PWM- säädölle ja tuulettimien ohjaukselle tarvitaan pienoisjännitelähde. Virrat ovat kyseisissä ohjauksissa niin pieniä, että kaupasta löytyy runsaasti edullisia ratkaisuja käyttötarkoitukseen.



Kuva 11. Virransyöttö yksinkertaistettuna. Kuvasta voi havaita mikä on päävirtalähde ja LED-virtalähde.

### 3.4.3 Johdintiet ja johdinpaksuudet

LEDeille kulkee maksimissaan ampeerin (A) virta. Tälle virralle tulee käyttää vähintään  $0,15\text{mm}^2$  johdinpaksuutta. Jotta asentaminen on mahdollisimman helppoa, käytetään järkevissä rajoissa mahdollisimman ohuita johtimia. Kuitenkin valitaan johdinpaksuudet sen mukaan, että jännitehäviöitä ei synny matkalla suuresti. LEDeille käytetään  $0,22\text{mm}^2$  johdinpaksuutta, pisimpien vetojen ollessa korkeintaan metrin luokkaa.

Pidempien vetojen yhteydessä, kuten päävirtalähteeltä BuckPuck- korteille, käytetään hiukan ylimitoitettuja johdinpaksuuksia ( $1,5\text{mm}^2$ ), jotta suuremmilta jännitehäviöiltä vältetään. Myös on huomioitava, että virta kulkee hakkurilaitteisiin piikkimäisesti, jol-



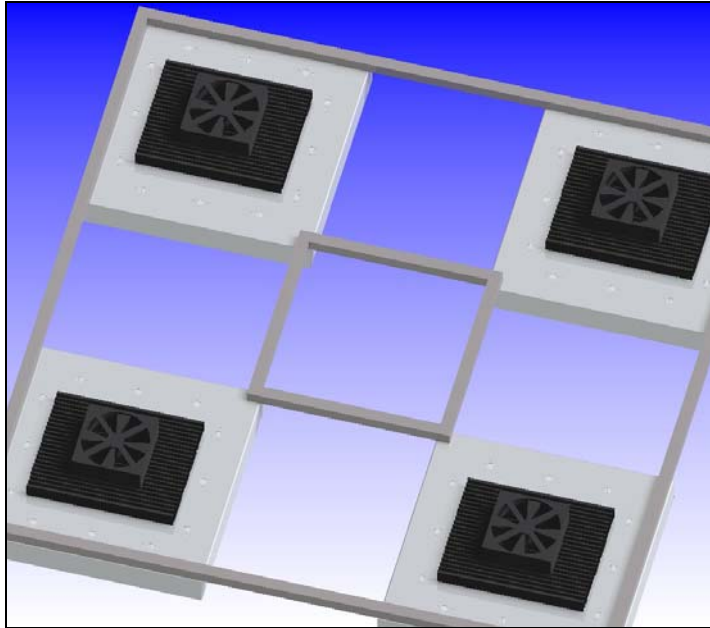
loin virran hetkellinen huippuarvo voi olla huomattavastikin virran keskiarvoa suurempi.

Johdinteinä käytetään pienoispennitteen sallimaa pinta-/avojohdotusta. Suuremmat johtimet kiinnitetään vakaisiin osiin, jotta hyvä vedonpoisto saadaan aikaan. Myös läpivienneissä huolehditaan terävien reunojen suojauksesta. Johdotusperiaatteena on hyvä käyttää mahdollisimman selkeää johdotusta, johtimien kulkeminen nipuissa ja mahdollisimman hyvin jäykkiin osiin kiinnitettynä.

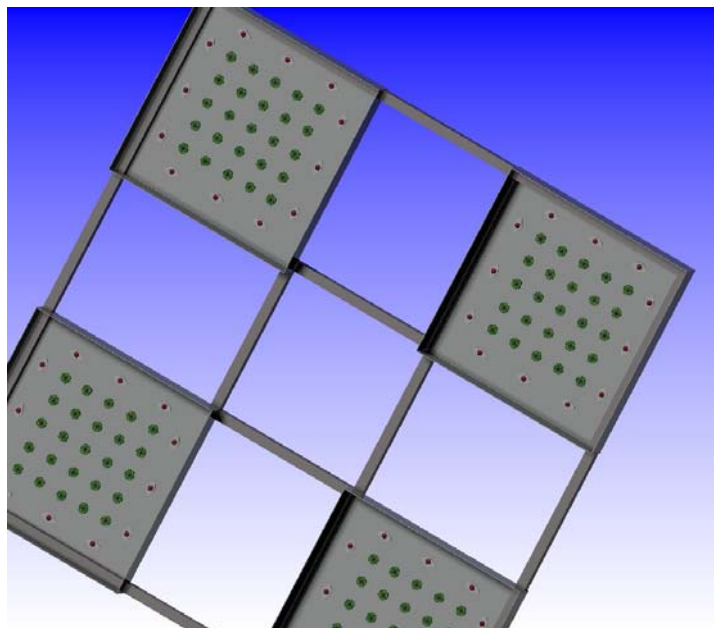
### 3.5 Lopputulema

Kaiken suunnittelun lopputuloksena valaisin rakennettiin moduuleista. LED -ryhmät sijoitettiin erillisiin alumiinisiin levyrakenteisiin, joissa jokaisessa on erillinen jäähdytys. Eri moduulit yhdistettiin toisiinsa valaisimeksi jäykillä teräsputkista valmistetuilla kehysrakenteilla. Kuvassa 12 on mallinnusohjelman tuottama kuva puna-kaukopuna-valaisimesta. Yhdessä moduulissa on yksi ryhmä punaista ja yksi ryhmä kaukopunaista väriä. Johtimia ei ole mallinnettu, kuten ei muutakaan sähkönsyöttöä. Kuvassa 13 esitetään sama valaisin alapuolelta. Sinisen valon valaisin on hyvin samannäköinen edellisten kanssa. Sinisen valaisimen kuvat on esitetty liitteissä 2 ja 3.

Valaisimia ohjataan yksinkertaisella mekaanisella ajastimella. Rengassydänmuuntajien käynnistysvirtasysäystä rajoittaa muuntajavalmistajan sysäyksenrajoitin. PWM -säätö toteutetaan erillisillä piireillä, jotka ohjaavat BuckPuck -lähteiden sisäistä säätölogiikkaa. Pulssisuhteen määrittäminen tapahtuu säätövastuksen avulla käsisäätöisesti. Jäähdytyspuhaltimiin asennetaan termostaattiohjaus. Termostaattiohjaus säästää, koska puhaltimet toimivat vain jos valaisin lämpenee yli säädetyt asetusarvon.



Kuva 12. Mallinnusohjelman kuva puna-kaukopuna-valaisimesta.



Kuva 13. Mallinnusohjelman kuva puna-kaukopuna-valaisimesta pohjan puolelta.

## 4 Valaisimen rakentaminen

Valaisin rakennettiin eri komponenttien toimituksen sallimassa järjestyksessä. Rakennustyö alkoi virtalähteistä jotka tuottavat 230 V vaihtojännitteestä noin 32 V tasajännitettä. Myös loppujen elektroniikkakomponenttien toimitukset olivat hyvin nopeita, joten BuckPuck -vakiovirtalähdekorttien valmistaminen oli seuraavaksi vuorossa. Valaisimen runkojen taivutus alumiinilevystä ja LEDien sekä jäähdytyslementtien liimaus runkoihin oli seuraava vaihe. Tämän lisäksi enää kokoonpano oli jäljellä.

Kaikkien erillisten osien valmistaminen on melko nopea toimenpide. Koko järjestelmän kokoonpano vei runsaasti aikaa. Erittelen myöhemmin joitakin työtuntimääriä eri vaiheiden yhteydessä. Kuvien kanssa varustettuna pyrin tässä kappaleessa kertomaan valmistuksen eri vaiheita ja niissä tapahtuneita huomioita.

### 4.1 Virtalähde

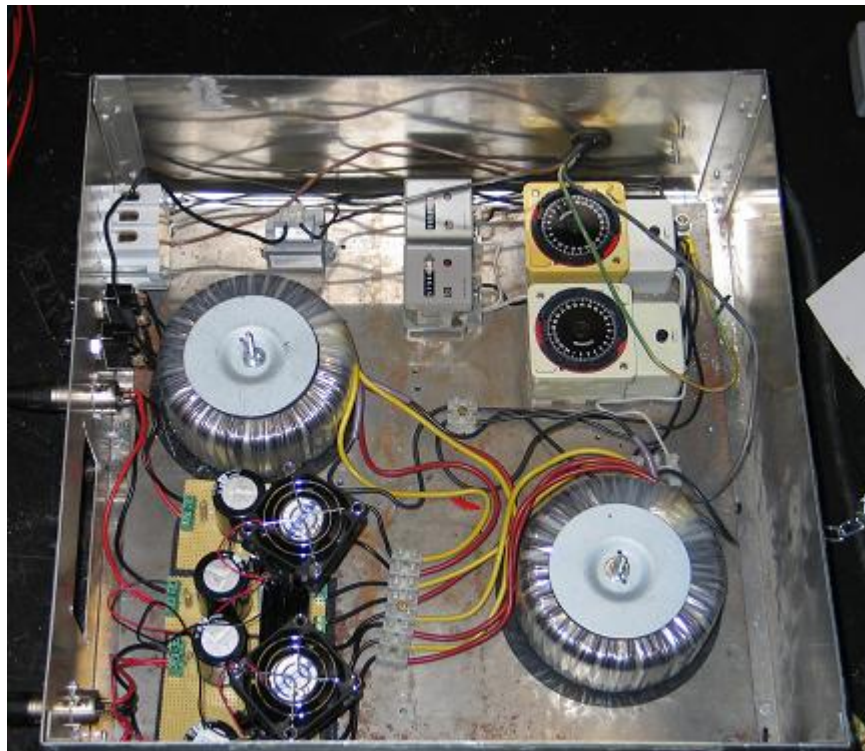
Valaisimen aikaohjausta ja päävirransyöttöä ohjaava päävirtalähde rakentui projektissa osien toimitusaikatauluista johtuen ensimmäisenä. Muutoinkin on viisasta rakentaa tämä komponentti ja testata sen toimivuus ensimmäisenä. Jos suunnitelmissa on jokin virhe ja tämä laite ei toimisikaan, on hyvä päästä muuttamaan suunnitelmia siten, että jollakin toisella järjestelyllä laitteet saadaan toimimaan. Tämä komponentti on koko laitteiston kannalta mitoittavimpia.

Virtalähde rakentui aiemmin loistelamppujen ajastuksessa käytettyjen ohjausvirtalähteiden sisään. Aiemmat virtalähteet oli rakennettu niin, että ajastinkellot ohjasivat kontaktoreja, joilla ohjattiin varsinaista virransyöttöä. Jokaisen lähdön käyttötuntien laskemiseen oli kytketty laskurit. Eli siis varsin yksinkertainen järjestelmä. Nämä sijoitettiin yhteen alumiinikoteloon.

Uusi päävirtalähde oli myös hyvä saada mahtumaan kyseiseen alumiinikoteloon. Kotelosta poistettiin kontaktorit ja muutoinkin paljon tähän käyttötarkoitukseen tarpeetonta tavaraa. Näin saatiin tilaa kahdelle muuntajalle ja tasajännite-järjestelmälle. Vanhat

ajastimet ja käyttötuntilaskurit säilytettiin. Myös sysäysvirran rajoitin asennettiin koteloon.

Rakentamisessa kiinnitettiin erityistä huomiota siirrettävyyteen ja kestävyys. Kaikki osat on ruuvattu tai pultattu tiukasti kiinni koteloon. Samoin koteloon on asennettu erittäin kestävät liittimet virtalähteestä valaisimille meneville johdoille. Näin saatiin aikaan täysin erillisenä siirrettävä rakenne.



Kuva 14. LED- kasvivalaisimen päävirtalähde. Oikeassa yläkulmassa on aikaohjausta tekevät kellot, vasemmassa alakulmassa tasasuuntaus- ja suodatusosio.

Ensimmäisissä koepoltoissa huomattiin, että päävirtalähteiden tasasuuntaussillat kuumenevat voimakkaasti. Jokaisessa sillassa tapahtuu noin 1,2 V jännitehäviö ja kun virta on keskimäärin noin 5 A, tapahtuu jokaisessa sillassa noin 6 W tehohäviö. Tämä häviö ilmenee lämpönä silloissa, joten sillat tulee jäähdyttää riittävän tehokkaasti. Jäähdytyksen tarve selvitettiin kokeilumenetelmällä. Ensin siltoihin kiinnitettiin suurin mahdollinen kyseiseen tilaan mahtuva passiivinen jäähdytyslementti. Kun tämä jäähdytys mahdollisti vielä siltojen lämpenemisen noin 80 °C:een, lisättiin jäähdytyslementtien päälle

vielä pienet tuulettimet. Näin saatiin aikaan jäähdytysratkaisu joka sallii tasasuuntaussiltojen lämpenemisen noin 40 °C:een. Kuvassa 14 on kyseinen virtalähde valmiina. Jokaisen kolmen valaisimen virtalähteet ovat lähes identtisiä toisiinsa nähden, sinisen valaisimen virtalähteessä käytetään ainoastaan yhden kellon ohjausta.

## 4.2 Vakiovirtalähteet LEDeille ja ohjauselektroniikka

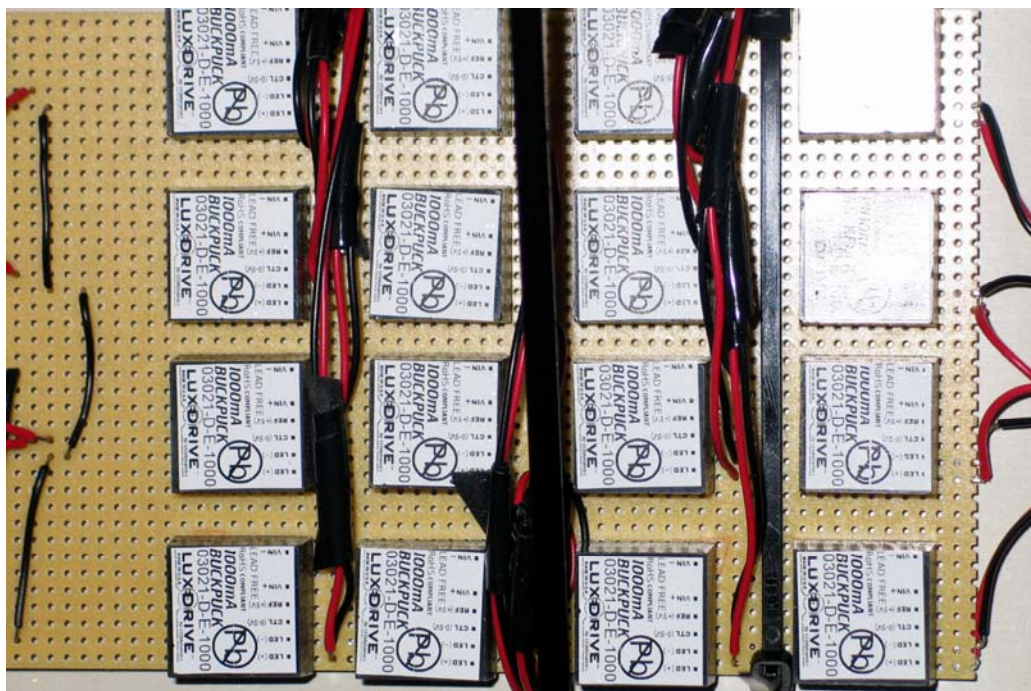
Edellisessä kappaleessa kuvattu päävirtalähde syöttää valaisimelle jännitettä, joka vaihtelee 28–34 V välillä kuormituksesta riippuen. Tällä jännitteellä ajetaan BuckPuck- virtalähteitä, joiden tulisi ajaa LED- sarjoja 700 tai 1000 mA- vakiovirralla riippuen LEDien nimellisvirroista. Sinistä ja kaukopunaista LEDiä ajetaan 700 mA virralla. Punaista LEDiä ajetaan 1000mA virralla.

LED-virtalähteet kasattiin reikälevylle yksinkertaisen asennuksen, yhteisen jännitysyhteyden ja yhteisen kontrollijännitteen mahdollistamiseksi. Yhdelle levylle pystyy asentamaan korkeintaan 20 LED-virtalähdettä. Tämän takia yhden valaisimen kaikkia LED -virtalähteitä ei voitu asentaa yhdelle levylle vaan sinisen valon LED-virtalähteet asennettiin kahdelle levylle kuten myös kaukopunaisten LEDien virtalähteet. Kuvassa 15 on puna-kaukopunaisten valaisimen toinen vakiovirtalähtelevy johdotuksineen kiinni valmiissa valaisimessa.

BuckPuck- virtalähteiden ajovirtaa voi säätää kuvan 16 mukaisesti syöttämällä ohjausjännitettä virtalähteen kontrollinastaan. Mahdollisuutena LEDien himmentämiseen on PWM- säätö tai virran lineaari- eli amplitudisäätö. PWM- säätöä pidetään yleisesti parempana, koska näin ei valon spektri juurikaan muutu. Mittauksissa havaittiin, että käyttämässämme LEDeissä huippuaallonpituus ei muutu vaikka käytettäisiin lineaarisäätöä.

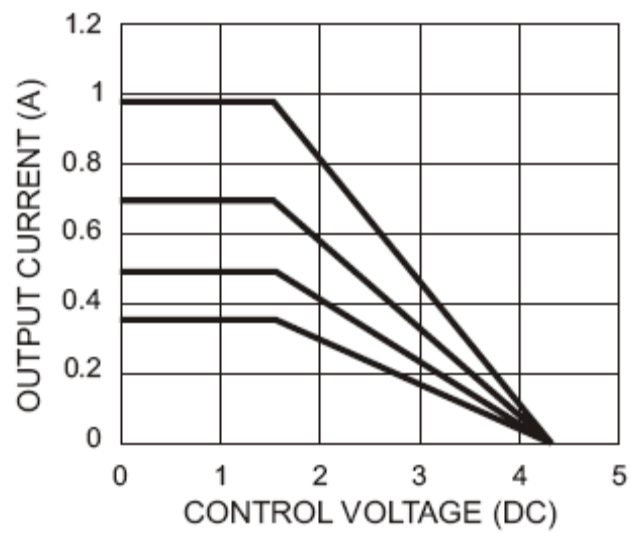
Koska PWM- säätö vaatii elektroniikkakomponentteja huomattavasti lineaarisäätöä enemmän, koimme sen tässä tapauksessa käyttötarkoitukseen turhan monimutkaiseksi. Tämän työn valaisimissa käytetään siis lineaarisäätöä, joka toteutetaan potentiometrin ja ulkoisen jännitelähteen avulla. Jokaisen BuckPuck- moduulin kontrollinastan sisäänmenoimpedanssi on noin 1 k $\Omega$ . Tämän tiedon pohjalta laskettiin sopiva potentiometrin arvo siten, että jännite kontrollinastoissa laskee täyden impedanssin kanssa huomatta-

vasti alle 1,6 voltin, joka on kuvan 16 mukainen alarajajännite säädön alkamiselle. 5 V-virtalähde toteutettiin yksinkertaisesti 7805-mallisella jänniteregulaattorilla, joka otti käyttövirtansa valaisimen käyttöjännitteestä. Jänniteregulaattoreihin kiinnitettiin vielä pienet jäähdytyslementit puolijohteen turvaamiseksi. Valmiit säätimet esitetään kuvassa 16.

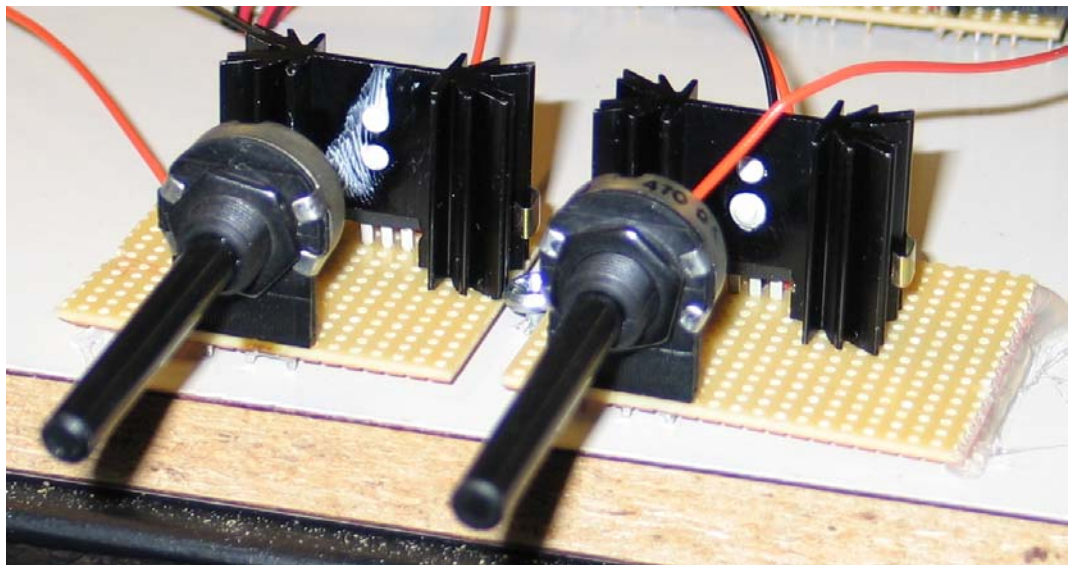


Kuva 15. BuckPuck- virtalähdeasennus.





Kuva 16. BuckPuck- virtalähteen säätökäyrästä. Pystyakselilla on lähteen ulos ajama virta ja vaaka-akselilla kontrollinastan jännite suhteessa BuckPuck-virtalähteen 'LED'-potentiaaliin. [13]



Kuva 16. Himmennyssäätimet.

### 4.3 Valaisimen rungot sekä LEDien ja jäähdytyslementtien kiinnitys

Valaisimet rakennettiin moduuleista, kuten oli suunniteltu. Moduuleiden runkolevyt taivutettiin tiedekunnan protopajalla. Materiaalina käytettiin 1,0 ja 1,5 mm alumiinilevyä. 500\*500 mm- kokoisista levyistä leikattiin 50\*50 mm- kokoiset palat pois kulmista. Näin mahdollistettiin hyvin helppo taivuttaminen. Leikatut palat taivutettiin vielä kulmiksi. Nämä kulmat niitattiin moduulien runkoihin tuomaan lisäjäykkyyttä ja suojaamaan teräviltä levyn reunoilta.

LEDien ja jäähdytyslementtien kiinnitykseen moduuliin oli kaksi hyvää vaihtoehtoa tarjolla, joko lämpöä johtava liima tai teippi. Liimalla saavutetaan erittäin luja liitos ja erinomainen lämmönjohtavuus. Teipin etuina voidaan pitää helppoa asennettavuutta ja mahdollisuutta irrotukseen komponentin rikkoutuessa. Alustavissa testeissä tarran liitoslujuus kuitenkin tuntui olevan pitkään käyttöön liian heikko tai ainakin hivenen epävarma. Lisäksi valmistaja ei pystynyt takaamaan kyseisen teipin kosteudensietoa. Kiinnitysmateriaaliksi valikoitui näin LOCTITE 5404- liima [14]. Tämä liima on sili-konipohjainen ja siten kosteudenkeston kanssa ei ollut ongelmaa. Myös kiinnityslujuus on erittäin suuri.

Itse liimaus on melko yksinkertainen toimenpide, mutta vaatii valmistusteknistä laitteistoa. Liima levitettiin liimattavien kappaleiden väliin, jonka jälkeen kovetettiin 130 °C:ssa uunissa tunnin ajan. Ensin liimattiin LEDit ja viimeiseksi jäähdytyslementit. Suurikokoisten elementtien kiinnityksen kanssa kannattaa olla tarkkana, sillä ohuissa levykappaleissa saattaa esiintyä jännityksiä, jotka saattavat aiheuttaa lämmön vaikutuksesta levyyn muutoksia. Näin kiinnitys saattaa jäädä vajavaiseksi.

Valaisimeen tarvittiin vielä jäykästä neliöputkesta valmistetut kehysrungot, jotka yhdistävät moduulit yhdeksi valaisimeksi. Mallinnuksen mukaiset rungot tilattiin valmiiksi rakennettuina alihankkijalta. Materiaalina 20\*20 mm- teräsputki. Rungot suojattiin korroosiolta mustalla metallimaalilla.



## 4.4 Kokoonpano

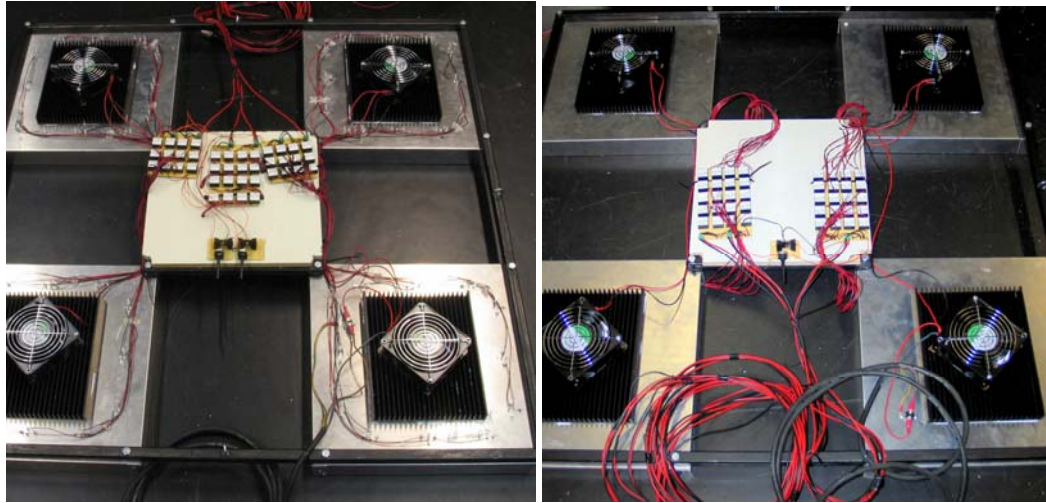
Kokoonpano oli koko rakennusvaiheen eniten aikaa vievin vaihe. Kokoonpano aloitettiin kehysrunkojen sovittamisella moduuleihin. Runkoihin porattiin 8,3 mm reiät ennen maalausta. Maalin kuivuttua moduulit kiinnitettiin M8\*16 mm pulteilla ja lukkomuttereilla tiukasti runkoihin.

Selkeästi koko projektin työläin vaihe oli LEDien johdottaminen virtalähdekorteille. Piirikortit kiinnitettiin valaisimen keskelle kiinnitettyyn puukuitulevyyn. LEDit oli juotettu sopiviksi ryhmiksi moduuleissa jo ennen kiinnitystä runkoon. Jokaista ryhmää ohjaa yksi BuckPuck- vakiovirtalähde. Yhteensä LED-ryhmiä oli 120 kappaletta. Tämä tarkoittaa että vedettäviä johtoja oli yhteensä 240 kappaletta. Johdotukseen meni aikaa yhteensä 7 työpäivää.

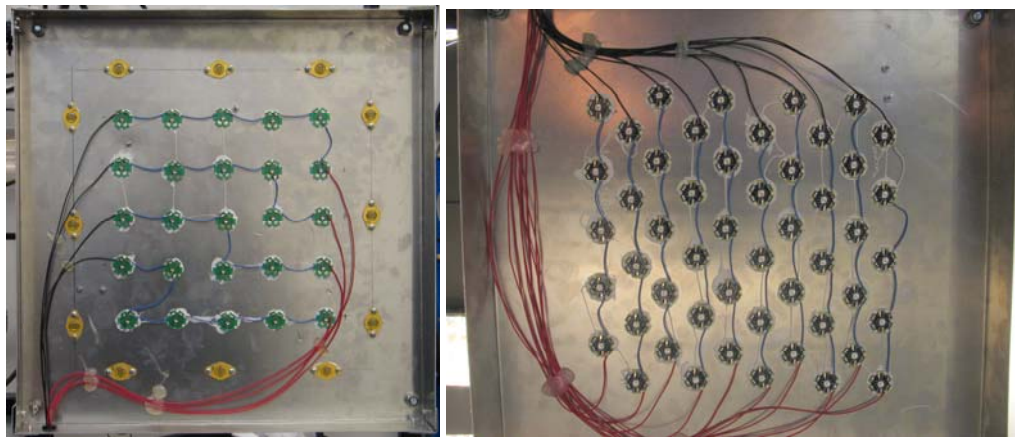
Johdotuksen ja toiminnan nopean testauksen jälkeen valaisimiin kiinnitettiin tuulettimet ja termostaatit. Koska tuulettimet toimivat verkkojännitteellä ja ylimääräinen johdotus virtalähteiltä asti koettiin huonoksi ratkaisuksi, liitettiin tuulettimiin oma pistotulppa. Tuulettimiin kiinnitettiin lopuksi vielä sormisuojat.

Valaisimien kiinnitys lopullisessa sijoituspaikassa tulee tapahtumaan ketjujen avulla. Näin saavutetaan helppo korkeuden säätö tarvittaessa. Ketjujen kiinnitystä varten valaisimiin kiinnitettiin sopivat koukut kannatuspisteisiin.

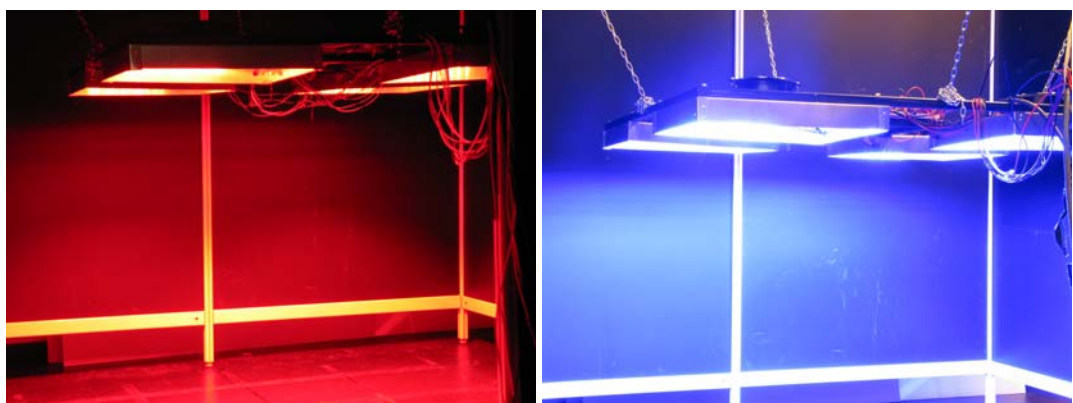
Mahdollisten vikatilanteiden varalle päävirtalähteeltä valaisimille meneviin johtoihin kolvattiin sulakerasiat ja varokkeet asennettiin paikalleen. Kuvissa 17–19 on esitetty valmiit valaisimet.



Kuva 17. Valmiit valaisimet. Vasemmalla Puna-kaukopuna-valaisin, oikealla sininen.



Kuva 18. Valaisimien moduulit alapuolelta. Puna-kaukopuna-valaisin, oikealla sininen.



Kuva 19. Valaisimet koepoltossa.

## 5 Valaisimien testaus ja mittaus

Mittaaminen on tärkeä osa valaisimen valmistusprosessia. Mittauksen tärkeys nousee esille varsinkin kun valaisinta kehitetään eteenpäin. Mahdolliset suunnitteluvirheet voidaan korjata seuraaviin malleihin ja parhaassa tapauksessa vielä jotain on tehtävissä mitattavaan valaisimeen.

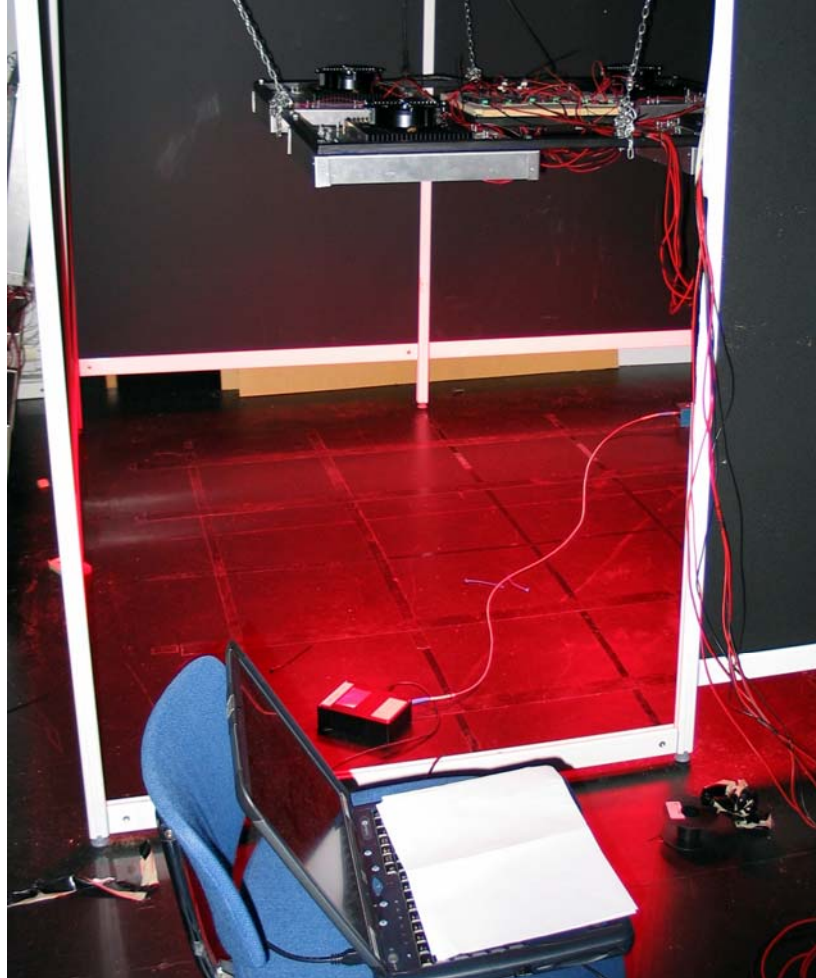
### 5.1 Mittausmenetelmät

Säteilymittaukset suoritettiin kahdella eri menetelmällä. Moduulivaiheessa eri aallonpituuksien säteilyteho mitattiin TKK:n valaistusyksikön integroivalla pallolla. Näin varmistettiin lähinnä, että moduulit toimivat likimain oikealla tasolla ja mahdollisiin suurempiin suunnitteluvirheisiin luotiin mahdollisuus puuttua jo tässä vaiheessa. Näitä mitaustuloksia ei esitellä työssä sen tarkemmin, koska kyseessä oli vain lähinnä tarkistus-toimenpide.

Säteilymittaukset suoritettiin Ocean Optics HR4000 spektroradiometrillä. Mittauksia varten rakennettiin erillinen hyvin vähän heijastava kevytrakenteinen mittaustila, jonne suoritettiin valaisimien mittausasennus. Näin pystyttiin varmistamaan mahdollisimman häiriintymätön mittaus. Kuvassa 20 on havainnollistettu mittausjärjestelyä. Mittaustilan lattiaan merkattiin mittausta varten mittausrasteri. Mittauspisteiden väli oli 17,5 cm ja mittauspisteitä oli yhteensä 81. Valaisimen korkeus oli muutettavissa helposti.

Valosta haluttiin mitata PPF -arvo. Sinisestä ja punaisesta arvo voitiin mitata suoraan. Koska standardin mukainen Fotosynteesistä aktiivinen säteily (PAR) on määritelty ainoastaan välille 300–700 nm, jouduttiin kaukopunaisen valon arvo laskemaan käsin. Arvon laskenta suoritettiin siten, että punaisesta valosta otettiin ylös sekä kyseiseen pisteeseen kohdistuva säteilyteho että PPF -arvo. Näistä laskettiin keskiarvona tehon ja PPF -arvon välinen kerroin, koska PPF -arvo on lineaarinen suhteessa aallonpituuteen, voitiin tämä kerroin skaalata 735 nm aallonpituudelle sopivaksi ja näin pystyttiin laskemaan ekvivalentti PPF -arvo kaukopunaiselle valolle. Laskentamenetelmä ei ole täysin tarkka, mutta riittävä.

Sähkötekniset mittaukset suoritettiin oskilloskoopilla. Oskilloskoopilla mitattiin jännitteen ja virran tehollisarvo sekä vaihtelu ajan funktiona.



Kuva 20. Säteilyn mittausjärjestely. Lattiassa on huomattavissa mittausrasteri. Mittalaitteen arvot analysoitiin tietokoneen avulla.

## 5.2 Mittaustulokset

### 5.2.1 Säteilymittaukset

Valaisimista mitattiin edellisessä kappaleessa kuvatulla menetelmällä säteilyarvot. Koska aiemmin moduulien mittauksissa havaittiin, että LEDien suoritusarvot voivat jäädä valmistajan lupauksia huomattavasti alemmas, päätettiin mitata valaisimet myös 70 cm korkeudessa suunnittelukorkeuden 100 cm lisäksi. Tulokset on koottu taulukkoon 2. Valaisimien säteilynjakokäyrästä on esitetty kuvissa 21-23. Mittaustuloksista laskettiin myös säteilyarvot pienemmältä 105\*105 cm alalta. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Kasvivalaisimien säteilyarvot, mitattu 140 cm x 140 cm alalta.

Aallonpituus	460 nm		660 nm		735 nm	
Sijoituskorkeus (cm)	100	70	100	70	100	70
Keskiarvo ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2, \text{s}$ )	33,8	46,7	71,3	92,3	26,3	36,9
Minimi ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2, \text{s}$ )	19	19	30	36	16	17
Tasaisuus	0,56	0,41	0,42	0,39	0,60	0,45

Taulukko 3. Kasvivalaisimien säteilyarvot, mitattu 105 cm x 105 cm alalta.

Aallonpituus	460 nm		660 nm		735 nm	
Sijoituskorkeus (cm)	100	70	100	70	100	70
Keskiarvo ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2, \text{s}$ )	35,7	51,0	77,8	102,0	27,7	40,0
Minimi ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2, \text{s}$ )	30	36	63	74	26	27
Tasaisuus	0,84	0,71	0,81	0,73	0,94	0,66

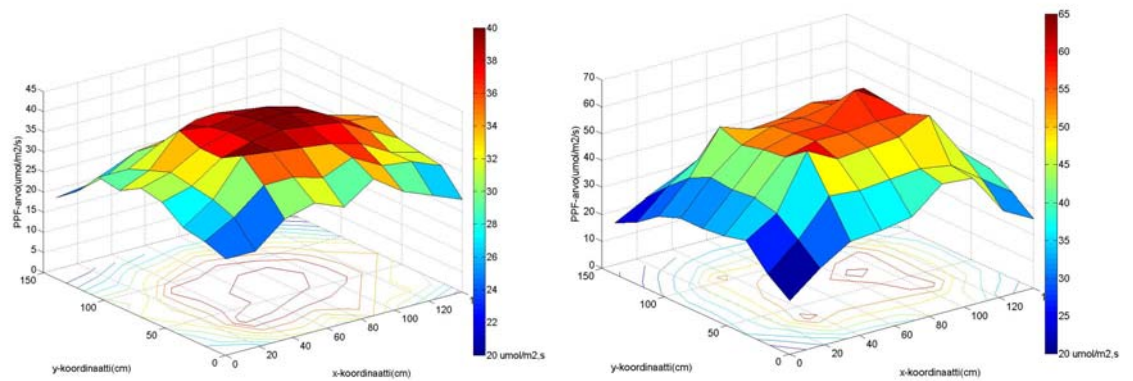
Tuloksista havaitaan, että valaistavan alan laidoilla valon määrä on vähäinen, ja siksi tasaisuus kärsii huomattavasti. Pienemmällä alalla tasaisuus on jo erittäin hyvällä tasolla. Valaisimen sijoituskorkeuden laskeminen 70 cm korkeudelle nostaa säteilyn keskiarvoa, mutta laskee tasaisuutta.

Myös valaisimien säteilystä mitattiin ajallinen vaihtelu. LEDeille on tyypillistä, että lämmitessään niiden valontuotto heikkenee. Tämän työn valaisimissa valontuotto päälekytkennän ja stabiloitumisen välillä menee seuraavasti:

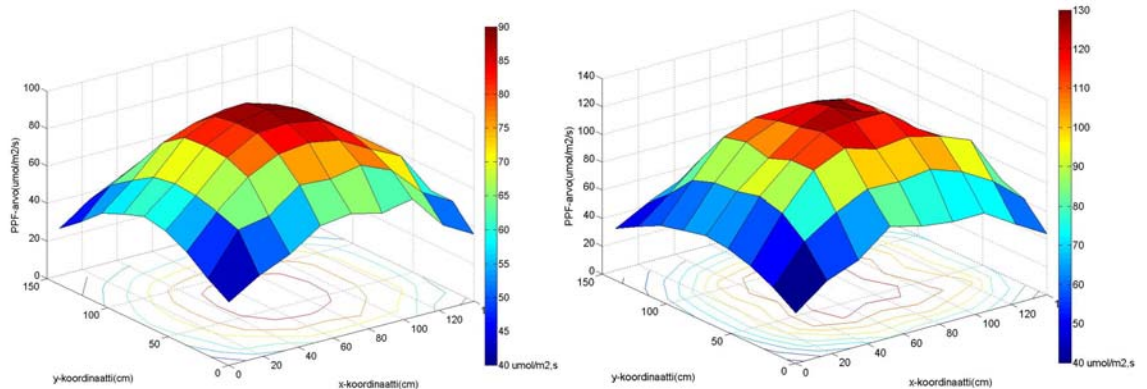
- Punaisella valolla säteilyn määrä kasvaa 8 %.

- Kaukopunaisella valolla säteilyn määrä kasvaa 2 %.
- Sinisellä valolla säteilyn määrä heikkenee 1 %.

Syyksi tällaiseen käytökseen voidaan pitää hyvin onnistuneen jäähdytyksen lisäksi LED- virtalähteiden kykyä syöttää korkeampaa virtaa LEDien kynnysjännitteiden pientyessä.

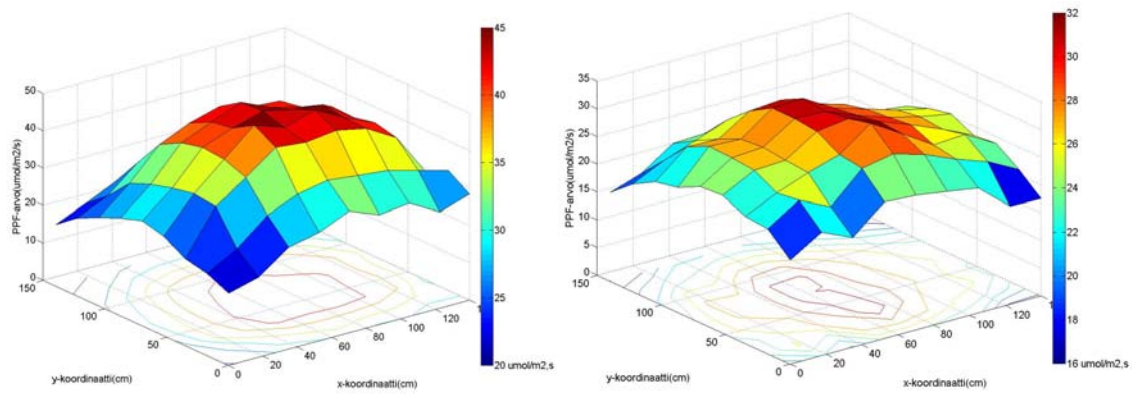


Kuva 21. 460 nm aallonpituuden säteilytyksenjakokäyrät. Vasemmalla metrin ja oikealla 70cm sijoituskorkeus.



Kuva 22. 660 nm aallonpituuden säteilytyksenjakokäyrät. Vasemmalla metrin ja oikealla 70cm sijoituskorkeus.





Kuva 23. 735 nm aallonpituuden säteilynjakokäyrät. Vasemmalla metrin ja oikealla 70cm sijoituskorkeus.

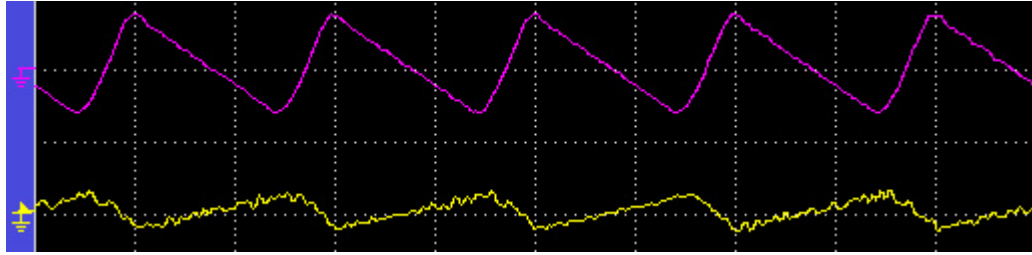
### 5.2.2 Sähkötekniset mittaukset

Sähkötekniset mittaukset tehtiin oskilloskoopilla. Päävirtalähteestä kaikkein mielenkiintoisin mittausta on jännite ja sen tehollisarvo, jotta voidaan varmistaa, että jännite pysyy riittävän korkealla tasolla LEDien vakiovirtalähteille. Myös virta mitattiin. Päävirtalähteiden mittaustulokset eri valon värien kohdalla on esitetty taulukossa 3. Tulokset ovat keskiarvoja. Virran vaihtelu on huipusta-huippuun arvo. Kuvassa 24 on esitetty jännitteen ja virran aaltomuodot päävirtalähteen ulostulossa. Taulukosta nähdään, että jännite on kaikissa tapauksissa riittävän korkea.

LED- virtalähteistä kiinnostavinta on tietää LED-ryhmille kulkeva virta. Taulukossa 4 on esitettynä vastaavat mittaukset kuin päävirtalähteille. Virtalähteen jännitteen ja virran aaltomuodot on esitetty kuvassa 25. Eri LED- ryhmien asetteluarvot olivat sinisille ja kaukopunaisille LEDeille 700 mA ja punaisille LEDeille 1000 mA.

Taulukko 3. Päävirtalähteiden sähkötekniset mittaukset.

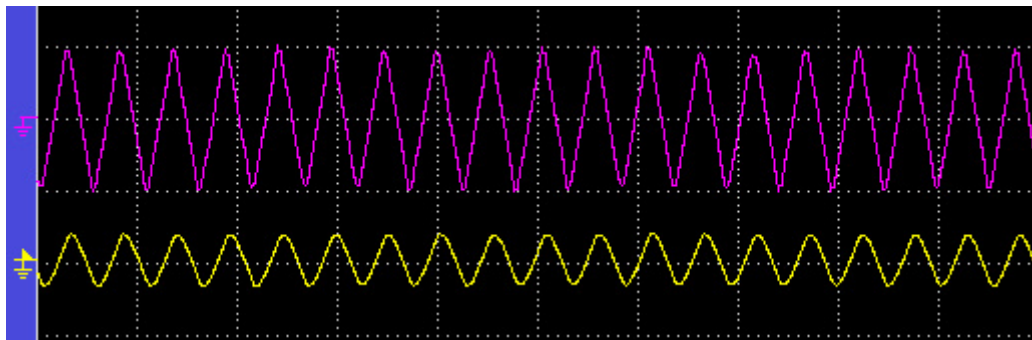
	Sininen	Punainen	Kaukopunainen
<b>Jännitteen tehollisarvo (V)</b>	30,4	30,7	30,4
<b>Jännitteen vaihtelu(V)</b>	2,5	2,9	2,9
<b>Virta (A)</b>	3,8	4,0	4,7
<b>Virran vaihtelu (A)</b>	0,29	0,31	0,42



Kuva 24. Päävirtalähteen ulostulon jännitteen ja virran aaltomuoto. Violetti käyrä on jännite ja keltainen on virta. Jännite nousee verkkotaajuuden mukana huippuarvoon, josta se laskee tasaisesti ennen seuraavaa aallon huippua. Virta seuraa jännitettä käänteisesti tehonkulutuksen ollessa kokoajan vakio. Tuloksista on suodatettu DC- komponentti pois, jotta käyrämuoto on saatu paremmin esille.

Taulukko 4. LED- virtalähteiden sähkötekniset mittaustulokset

	Sininen	Punainen	Kaukopunainen
<b>Jännitteen tehollisarvo (V)</b>	17,4	14,7	17,6
<b>Jännitteen vaihtelu(V)</b>	0,9	1,9	1,9
<b>Virta (mA)</b>	591	917	609
<b>Virran vaihtelu (mA)</b>	45	93	80



Kuva 25. LED- virtalähteen aaltomuoto. Violetti käyrä on jännite ja keltainen on virta. Virtalähde ajaa virtaa ylös ja alas hakkuriperiaatteella noin 20 kHz- taajuudella. Jännite seuraa virtaa suoraan, suhteellinen muutos on huomattavasti paljon pienempi. Tuloksista on suodatettu DC- komponentti pois, jotta käyrämuoto on saatu paremmin esille.



### 5.3 Päätelmiä tuloksista

Valoteknisissä mittauksissa on huomattavaa, että todelliset mittausravot eivät vastaa suunnitteluarvoja kovinkaan hyvin. Punaisen valon osalta päästiin lähelle suunnitteluarvoja. Valon määrä sekä tasaisuus ovat suunniteltuja alhaisempia. Tasaisuus kasvaa suu-  
resti, mikäli mittausaluetta pienennetään hieman alkuperäisestä. Mittausalueen laidoilla valon määrä pienenee voimakkaasti, mikä on osittain hyvä asia, koska näin valoa ei mene halutun alueen ulkopuolelle liikaa. Toisaalta voimakas aleneminen alkaa liian aikaisin ja suunnittelun mukaista tasaisuutta ei saavuteta.

Sähköteknisistä arvoista on havaittavissa, että LED -vakiovirtalähteet eivät toimi myöskään luvutulla tavalla. Virta on 10–15 % alhaisempi kuin tulisi olla. On myös huomattavaa, että ongelman taustalla ei ole päävirtalähteen heikkous. Päävirtalähteen jännite pysyy jatkuvasti huomattavasti ylempänä kuin LED -sarjojen ylimenojännite.

Tuloksista on havaittavissa LED -valaisimien suunnittelun suuri ongelma. Valmistajan arvot on usein mitattu olosuhteissa, joita ei normaalissa käytössä ole saavutettavissa tai tarkoituksenmukaista käyttää. Usein on myös havaittu, että LEDien ohjelehdissä ei ole kerrottu kaikkea informaatiota. Näiden valaisimien kohdalla LEDien säteilyteho ei ole sinisen ja kaukopunaisen valon osalta edes 50 %:a luvutusta. Osan virheestä selittää vakiovirtalähteiden luokaton virrananto, mutta vain noin 10–15 % alenema voidaan kohdistaa niiden syyksi. Myös on oletettavaa, että valon jako ei ole LEDeissä lambertianista, koska valon tasaisuus ei ole suunnitellun 70 % - tasolla vaan 45–65 % - tasolla.

Näiden ongelmien korjaaminen vaatisi sen, että ennen valaisimen suunnittelua tulisi voida erä LEDejä mitata. Näin voitaisiin varmistaa todellinen valon määrä ja jako. Ongelmalliseksi koituu kuitenkin se, että valmistajat eivät ole juuri tästä syystä kovin halukkaita lähettämään näyte-eriä testiin ja monella valaisimilla rakentavalla taholla ei ole mahdollisuutta LEDien testaamiseen laitteisto- ja resurssipulan takia.

## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa määriteltyjen ominaisuuksien mukainen LED- kasvivalaisin.

Työn alussa selvitettiin työn teoreettinen pohja ja käytiin läpi kasvien erikoisominaisuudet. Tämän kautta selvitettiin vaatimukset ja menetelmät valaisinsuunnittelulle.

Selvitysten perusteella saatua tietoa hyödynnettiin valaisimen suunnitteluprosessissa. Verrattain yksinkertaisen simuloinnin perusteella mallinnettiin valaisimen valaistustekniset ominaisuudet ja valaisimen mekaniikka suunniteltiin mallinnuksen avulla. Mekaanisen yhteydessä suunniteltiin valaisimen jäähdytys. Suurin haaste suunnittelussa oli valaisimen sähkötekkinen suunnittelu.

Työn lopussa dokumentoitiin rakennusprosessi ja siinä esiintyneet erityispiirteet. Rakennetun valaisimen ominaisuudet tarkistettiin lopuksi monivaiheisella mittaus- ja testausosuudella.

LED-valaisimen suunnittelu on vaativa ja monivaiheinen prosessi. Suunnitteluun ja rakentamiseen tarvitaan monenlaista osaamista. Tietotaitoa tulee löytyä valaistusteknisen osaamisen lisäksi myös elektroniikasta ja mekaanisesta suunnittelusta. Lisäksi rakentaminen vaatii omaa erikoisosaamisensa. Suunnittelun ja rakentamisen useista erityispiirteistä johtuen usein joudutaan käyttämään konsultaatiota ja alihankintaa projektin vaiheissa.

Työssä suunnitellut ja rakennetut valaisimet eivät täysin täyty niille asetettuja vaatimuksia. Irradianssi ja säteilyn tasaisuus eivät ole riittäviä. Suurin syy ongelmiin on komponenttien suorituskyvyn heikkous verrattuna valmistajien antamiin ja suunnittelussa käytettyihin arvoihin. Myös suunnittelijan kokemattomuus voi olla osin ongelmien syynä. LEDien yleiset suorituskykyongelmat ovat tunnettuja, joten ne olisi tullut ottaa paremmin huomioon. LEDien vakiovirtalähteiden heikko laatu oli suuri pettymys. Yleisesti elektroniikkatuotteet toimivat niistä annettujen tietojen mukaisesti ja valmistajien arvoihin voi luottaa.

Projektissa erityisen hyvin onnistuneena voidaan pitää jäähdytyksen suunnittelua. Valaisimen runko ei lämpene yli 60 °C juuri koskaan ja suurimman osan ajasta pintalämpötila pysyy alle 50 °C. Myös päävirtalähde ja kello-ohjaus toimivat moitteettomasti.

Tässä työssä on opittu paljon LED- valaisimen suunnittelusta ja suunnittelun haasteista. Työssä toteutettiin lähes tavoitteiden mukainen valaisin. Tämä työ luo vahvan pohjan LED- tekniikan osaamiselle.

## LÄHTEET

- [1] Kauppapuutarhaliitto, [www.kauppapuutarhaliitto.fi](http://www.kauppapuutarhaliitto.fi)
- [2] J.W. Hart, *Light and plant growth*. London: Unwin Hyman, 1988,
- [3] A. Pankakoski, *Puutarhurin kasvioppi*. Helsinki: painatuskeskus, 1990
- [4] Stark-Einstein-law, Wikipedia, Julkisesti muokattava ja saatava aineisto, 2007, [http://en.wikipedia.org/wiki/Stark-Einstein\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Stark-Einstein_law)
- [5] Anderson, N. et al..*BSCS Green Version. Biological Science An Ecological Approach*. Dubuque: Kendall/Hunt publishing company 1982. p 394
- [6] P. Pinho, E. Tetri and L. Halonen, , “Design and performance assessments of solid state light sources for plant growth” in *Proceedings of 10<sup>th</sup> European Lighting Conference Lux Europa2005: Lighting for Humans*. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V, 2005
- [7] Seoul Semiconductor Co. LTD, technical datasheet for X3228X, 2007, <http://www.zled.com/en/product/prd/zpowerLED.asp>
- [8] LedEngin Inc., High Luminous Efficacy Deep Red LED Emitter LZ1-00R205, 2008, <http://www.ledengin.com/products/5wLZ/LZ1-00R205.pdf>
- [9] Epitex Inc., Infrared illuminator L735-66-60, [http://www.epitex.com/global/Catalog\\_PDF/06\\_Custom\\_designed/065\\_Ultra\\_high\\_power\\_illuminator/L735-66-60.pdf](http://www.epitex.com/global/Catalog_PDF/06_Custom_designed/065_Ultra_high_power_illuminator/L735-66-60.pdf)
- [10] Aavid Thermalloy, Extrusion selection guide, power profiles for the European market, 2002
- [11] Aavid Thermalloy, Performance Factor Table, 2008, [http://www.aavidthermalloy.com/products/extrusion/convect\\_table.shtml](http://www.aavidthermalloy.com/products/extrusion/convect_table.shtml)
- [12] R. Fletcher, "High-efficiency aluminum indium gallium phosphide light-emitting diodes - includes related article on structure of LEDs - Technical". Hewlett-Packard

Journal. . August 1993

[http://findarticles.com/p/articles/mi\\_m0HPJ/is\\_n4\\_v44/ai\\_14190965](http://findarticles.com/p/articles/mi_m0HPJ/is_n4_v44/ai_14190965)

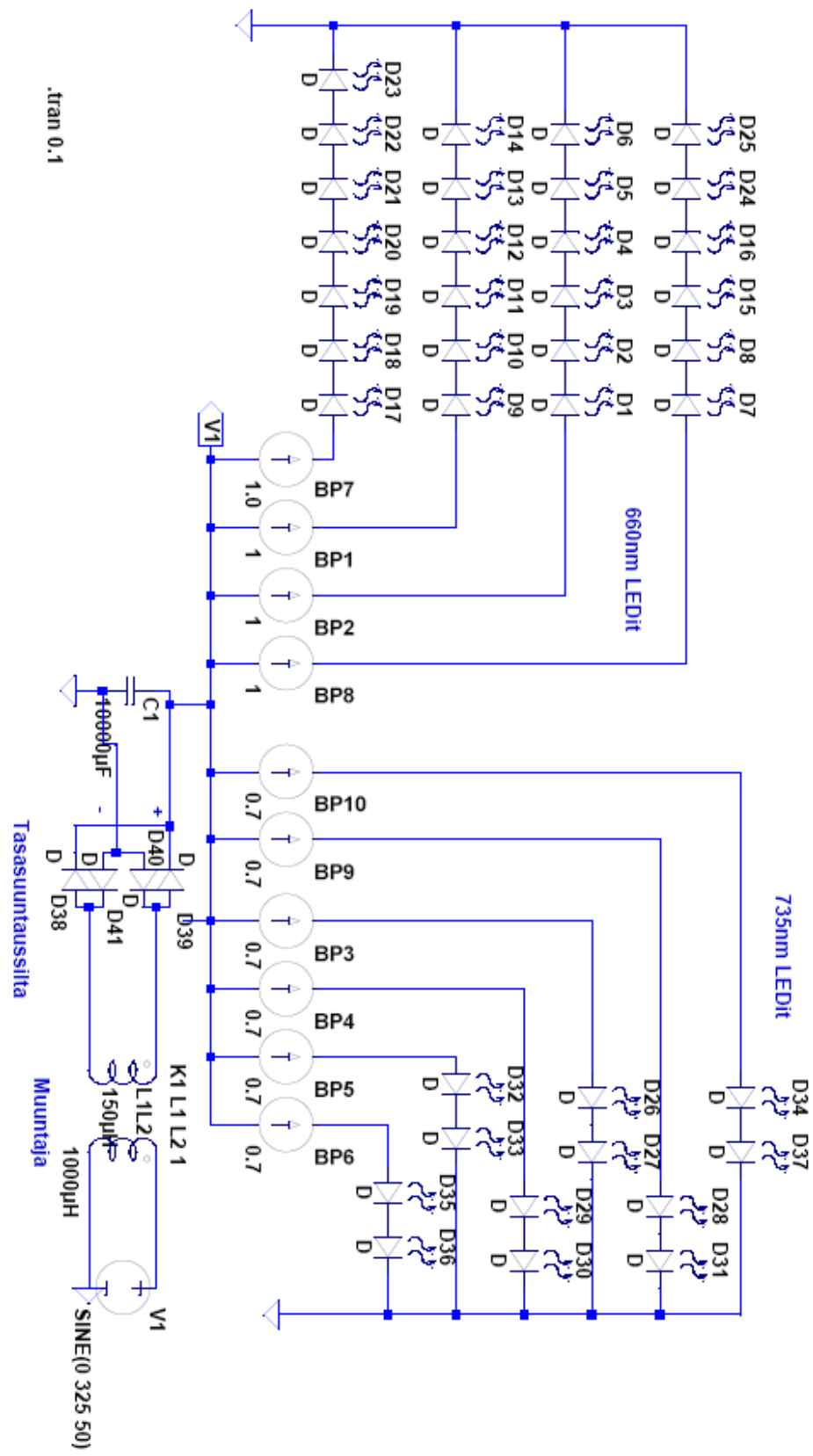
[13] LEDdynamics, 3021/3023 BuckPuck, Wide Range LED Power Module, July, 2005

<http://www.leddynamics.com/LuxDrive/datasheets/3021-BuckPuck.pdf>

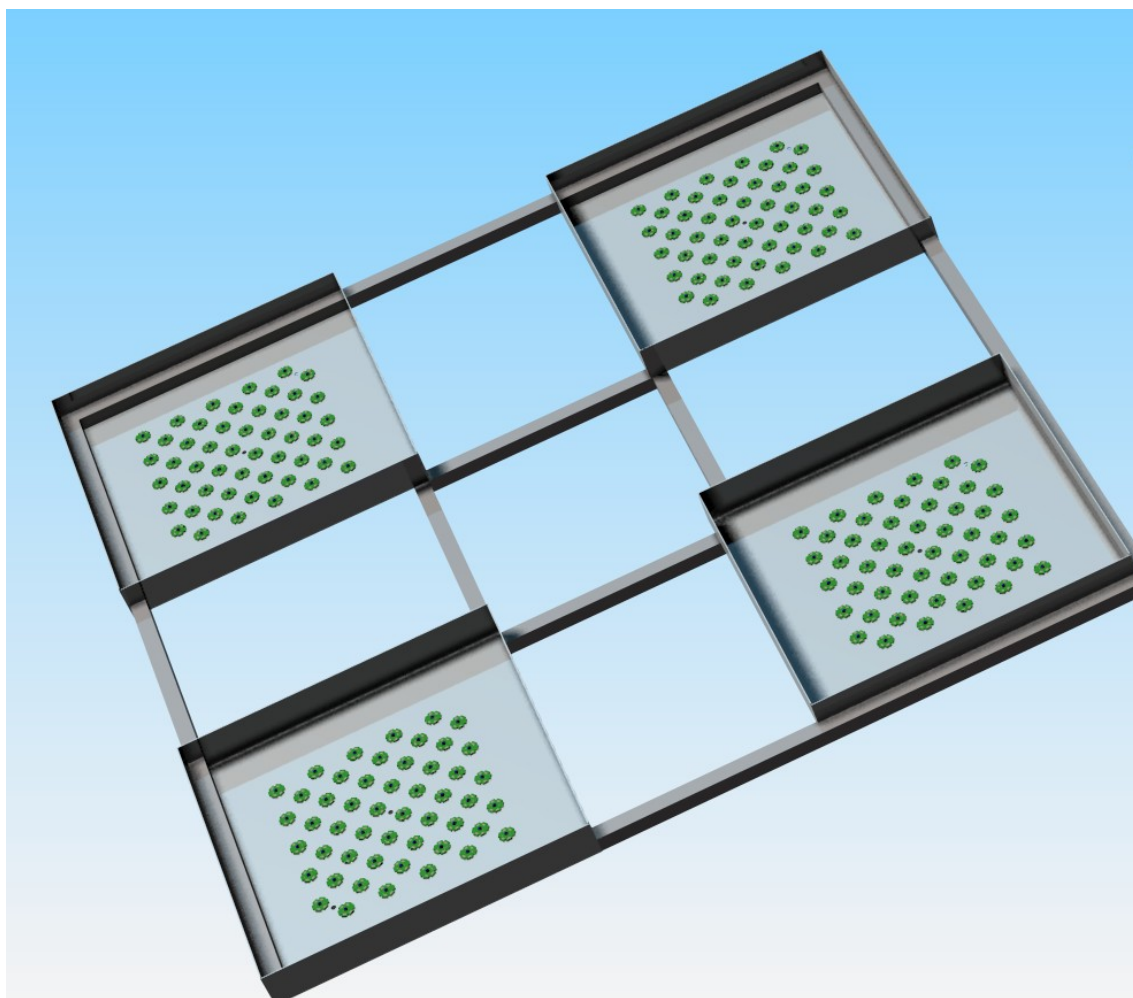
[14] Loctite, 5404 technical datasheet, March 2008

[https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/E9F6DA63B81BC8C7882571870000D80B/\\$File/5404-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/E9F6DA63B81BC8C7882571870000D80B/$File/5404-EN.pdf)

## LIITE 1: Virransyötön periaatekuva



## LIITE 2: Sinisen valaisimen mallinnuskuva pohjasta



LIITE 3: Sinisen valaisimen mallinnuskuva päältä

